

Міністерство освіти і науки України

Запорізький національний університет

(повне найменування вищого навчального закладу)

Інженерний навчально-науковий інститут ім. Ю.М. Потебні

(назва факультету)

кафедра металургійного обладнання

(повна назва кафедри)

## **ВИПУСКНА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА МАГІСТРА**

На тему Аналіз режимів роботи та вдосконалення підшипникового вузла кліті дресирувального стану

---

Виконав: магістрант групи 8.1332

Шупік С. О.

(ПІБ)

(підпис)

спеціальності

133 Галузеве машинобудування

(шифр і назва)

спеціалізація

\_\_\_\_\_  
(шифр і назва)

Освітньо-професійна програма

133.00.12 Металургійне обладнання

(шифр і назва)

Керівник

Огінський Й.К.

(прізвище та ініціали)

(підпис)

Н.контроль

Васильченко Т.О.

(прізвище та ініціали)

(підпис)

Запоріжжя – 2023 року

Запорізький національний університет

(повне найменування вищого навчального закладу)

Факультет Інженерний навчально-науковий інститут ім. Ю.М. Потебні

Кафедра металургійного обладнання

Рівень вищої освіти магістр

(другий (магістерський) рівень)

Спеціальність 133 Галузеве машинобудування

(шифр і назва)

Спеціалізація \_\_\_\_\_

(шифр і назва)

Освітньо-професійна програма 133.00.12 Металургійне обладнання

(шифр і назва)

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

Завідувач кафедрою А.О. Власов

“ \_\_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 20\_\_ року

**Завдання**

до випускної кваліфікаційної роботи магістра

Шупіка Сергія Олександровича

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема магістерської роботи: Аналіз режимів роботи та вдосконалення підшипникового вузла кліті дресирувального стану керівник магістерської роботи д.т.н, професор Огінський Й.К., затвержені наказом вищого навчального закладу від “09” жовтня 2023 року № 1581-с.
2. Строк подання студентом магістерської роботи 07 грудня 2023 року.
3. Вихідні дані магістерської роботи техніко-економічні показники роботи прокатного цеху.
4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити): 1. Огляд науково-технічних рішень підвищення надійності прокатного обладнання та обґрунтування обраного напрямку роботи 2. Розрахункова частина; 3. Дослідно-експериментальна частина; 4. Охорона праці та техногенна безпека в галузі. Загальні висновки та рекомендації
5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень): 1. Дресирувальний стан 1700 – 1А1; 2. Натискний пристрій робочої кліті стана 1700 – 2А1; 3. Підготовка до експерименту з дослідження моменту опору обертання підшипника – 1А1; 4. Результати дослідження впливу кута нахилу та частоти обертання на момент опору підшипника кочення – 1А1 5. Дослідження засобів зниження звукового навантаження на оператора дресирувального стану – 1А1;

6. Консультанти розділів магістерської роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
1	Огінський Й.К., д.т.н, професор		
2	Огінський Й.К., д.т.н, професор		
3	Огінський Й.К., д.т.н, професор		
4	Огінський Й.К., д.т.н, професор		

**КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН**

№ з/п	Назва етапів магістерської роботи	Строк виконання етапів магістерської роботи	Примітки
1	Збір матеріалу на проєктування	29.05.2023 – 25.06.2023	
2	Групування та аналіз зібраного матеріалу. Уточнення завдань проєктування	01.09.2023 – 17.09.2023	
3	Виконання теоретичної частини проєкту	18.09.2023 – 18.10.2023	
4	Виконання графічної частини проєкту	19.10.2023 – 19.11.2023	
5	Написання та оформлення пояснювальної записки	20.11.2023 – 30.11.2023	
6	Перевірка проєкту консультантами	01.12.2023 – 03.12.2023	
7	Попередній захист проєкту	04.12.2023	
8	Переплітання пояснювальної записки	Згідно з графіком	
9	Захист проєкту	Згідно з графіком	

Студент \_\_\_\_\_  
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник магістерської роботи \_\_\_\_\_  
(підпис) (прізвище та ініціали)

## АНОТАЦІЯ

Шупік С. О. Аналіз режимів роботи та вдосконалення підшипникового вузла кліті дресирувального стану

Кваліфікаційна випускна робота для здобуття ступеня вищої освіти магістра за спеціальність 133 – Галузеве машинобудування, науковий керівник Й.К. Огінський. Запорізький національний університет, інженерний навчально-науковий інститут ім. Ю.М. Потебні, кафедра металургійного обладнання, 2023.

Проаналізовані переваги та недоліки наявних технічних рішень спрямованих на підвищення ефективності роботи підшипникових опор робочих валків. Запропонований варіант модернізації підшипникового вузла робочої кліті дресирувального стану. Проведено аналіз методик розрахунку підшипників. Отримано математичну модкль залежності моменту опору обертання підшипника від кута його нахилу та частоти обертання.

Ключові слова: ДРЕСИРУВАЛЬНИЙ СТАН, ВАЛОК, ПІДШИПНИК, МОМЕНТ ОПОРУ

## ABSTRACT

Shupik S. O. Analysis of operating modes and improvement of the bearing assembly of the cage of the training state.

Qualification final work for obtaining a higher education degree of a master's degree in specialty 133 - Industrial engineering, scientific adviser Yo.K. Oginsky. Zaporizhzhia National University, Engineering Educational and Scientific Institute them. Yu.M. Potebni, Department of Metallurgical Equipment, 2023.

The advantages and disadvantages of existing technical solutions aimed at increasing the efficiency of work roll bearing supports are analyzed. An option has been proposed for modernizing the bearing assembly of the working stand of a temper rolling mill. An analysis of bearing calculation methods was carried out. A mathematical model of the dependence of the moment of resistance of rotation of a bearing on its angle of inclination and rotation frequency is obtained.

Key words: TEMPERMILL, ROLLER, BEARING, MOMENT OF RESISTANCE

## Зміст

Вступ	7
1 ОГЛЯД НАУКОВО-ТЕХНІЧНИХ РІШЕНЬ З УДОСКОНАЛЕННЯ ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ДРЕСИРУВАННЯ ПРОКАТУ ТА ОБҐРУНТУВАННЯ ОБРАНОГО НАПРЯМКУ РОБОТИ	9
1.1 Технологічний процес та опис основного обладнання для забезпечення дресування холоднокатаних листів	9
1.2 Огляд технічних рішень спрямованих на підвищення ефективності роботи валкового вузла дресувального стану	18
1.3 Пропозиції щодо модернізації обладнання та обґрунтування обраного напрямку	27
2 РОЗРАХУНКОВА ЧАСТИНА	28
2.1 Вибір електродвигуна приводу кліті дресувального стану 1700	28
2.2 Визначення крутного моменту та потужності двигуна електроприводу натискного механізму	30
2.3 Аналіз роботи натискного механізму за умови виходу з ладу одного з двигунів та погіршенням змащуванням гвинтової пари	32
2.4 Розрахунок підшипникових опор робочого валка	33
3 ДОСЛІДНО–ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ЧАСТИНА	37
3.1 Спрощена методика визначення моменту опору обертанню підшипників кочення	37
3.2 Огляд прогресивних методик визначення моменту тертя підшипників кочення	39
3.3 Експериментальні методи визначення моменту опору підшипників кочення	50
3.3.1 Мета та матеріально–технічне забезпечення проведення експерименту	50
3.3.2 Етапи проведення експерименту	57
3.3.3 Вимірювальна апаратура та програмні комплекси	57
3.3.4 Складання плану експерименту	63

	6
3.3.5 Обробка результатів проведення експерименту	66
4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ТЕХНОГЕННА БЕЗПЕКА В ГАЛУЗІ	73
4.1 Виявлення та оцінка шкідливих факторів виробничого середовища	73
4.1.1 Характеристика ступеня безпеки технологічного процесу, рівня механізації й автоматизації	73
4.1.2 Аналіз потенційних і шкідливих факторів виробничого середовища	74
4.2 Заходи захисту від впливу шкідливих факторів виробничого середовища	75
4.3 Технічні рішення по гігієні праці та виробничій санітарії	76
4.3.1 Мікроклімат	76
4.3.2 Природне й штучне освітлення	77
4.4 Техногенна безпека	78
4.4.1 Заходи щодо техніки безпеки при ремонтних роботах	78
4.4.2 Заходи пожежної безпеки	79
4.5 Дослідження засобів зниження звукового навантаження на оператора дресировального стана	81
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ	84
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ	85
СПИСОК ГРАФІЧНОГО МАТЕРІАЛУ	89
ДОДАТКИ	90

## Вступ

Близько 50% обсягу виробництва тонколистової сталі випускається у вигляді холоднокатаних листів та штаби. Пояснюється це тим, що холодна прокатка в порівнянні з гарячою має дві основні переваги:

1. Можливість прокочувати штабу завтовшки менше 1,0 мм.
2. Готова штаба та листи маю більш високу якість за всіма показниками – точності розмірів, обробки поверхні та фізико-механічними властивостями.

При малій товщині продукту, що прокатується, коли через велике відношення поверхні до об'єму швидке охолодження металу не дає можливість забезпечити високу температуру в деформаційній зоні, використовується холодна прокатка. Холодна прокатка надає виробам високі точність розмірів та якість поверхні, що неможливо при гарячій прокатці, а також особливі фізичні властивості.

Останніми роками виробництво холоднокатаного листа дедалі більше зростає. Це пов'язано з тим, що у багатьох галузях постійно зростає потреба в тонколистовій сталі з високими механічними властивостями, точними розмірами, гарною якістю поверхні.

Останнім етапом холодної прокатки є процес дресирування прокатоного металу, який суттєво впливає на якість кінцевого продукту цеху. Дресирування – прокатка з малими обтисканнями, величина яких не перевищує 2,0 %, ущільнює поверхневий шар на товщину кілька сотих міліметра. Цим запобігають появі ліній зсуву при наступному холодному штампуванні листової сталі. Крім того, дресируванням усувають неплщинність штаби і надають матову (шорсткувату) обробку поверхні штаби. Таким чином модернізація обладнання, на якому відбувається дресирування металу, а отже покращення якості поверхні холоднокатаних листів є актуальною і вельми важливим науково-виробничим завданням.

**Мета і задачі дослідження.** Метою роботи є дослідження роботи підшипникового вузла робочих валків дресирувального стану 1700 та

удосконалення його конструкції.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні задачі:

- виконати аналіз раніше проведених досліджень в питаннях удосконалення конструкції підшипникових вузлів прокатних станів з метою підвищення ефективності їхньої роботи;
- визначити навантаження, що діють на основні елементи, та виконати розрахунок основних виконавчих вузлів дресирувального стану 1700;
- виконати аналіз сучасних методик розрахунку підшипникових вузлів;
- розробити методику, експериментального визначення залежності моменту опору обертанню підшипника одночасно від двох факторів – частоти обертання й кута нахилу підшипника;

**Предмет дослідження** – конструктивні параметри дресирувального стану 1700 діляниці холодної прокатки.

**Об'єкт дослідження** – підшипниковий вузол робочих валків.

**Апробація результатів роботи.** Основні положення роботи доповідалися на: III Всеукраїнській науково-практичній конференції за участю молодих науковців «Актуальні питання сталого науково-технічного та соціально-економічного розвитку регіонів України». Запоріжжя: ЗНУ, 2023 р. Опубліковано тези доповіді.

**Структура та обсяг роботи.** Магістерська робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел, додатків. Загальний обсяг роботи включає 97 сторінок, у тому числі 86 сторінки основного тексту, 27 рисунків, 13 таблиць, 41 найменування використаних джерел на 4 сторінках, 7 додатків.

Робота виконана на кафедрі металургійного обладнання, інженерного навчально-наукового інституту ім. Ю.М. Потебні, Запорізького національного університету.



# 1 ОГЛЯД НАУКОВО-ТЕХНІЧНИХ РІШЕНЬ З УДОСКОНАЛЕННЯ ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ДРЕСИРУВАННЯ ПРОКАТУ ТА ОБІРУНТУВАННЯ ОБРАНОГО НАПРЯМКУ РОБОТИ

## 1.1 Технологічний процес та опис основного обладнання для забезпечення дресирування холоднокатаних листів

Основною виробничою продукцією дільниці холодної прокатки ПАТ «Запоріжсталь» є тонколистова сталь розмірами 0,5-2,0 x 1000-1500 мм. Прокатка проводиться на чотирьохклітинному стані 1680 Тандем і двох реверсивних одноклітинних станах 1200 і 1680, кінцева обробка холоднокатаної штаби процесом дресирування відбувається на чотирьохвалковому стані 1700.

Дресируванням називається процес холодної прокатки (без мастила та з мастилом) з невеликим обтисканням (0,5-3%). Метою дресирування є:

- поверхнєве зміцнення відпаленого металу з метою поліпшення його подальшої літалікування (утруднення утворень ліній плинності);
- виправлення металу та отримання гладкої, блискучої поверхні (необхідний для лудіння).

Для дресирування рулонної штаби застосовують чотиривалкові стани:

- а) одноклітинні нереверсивні для дресирування в один прохід штаби товщиною 0,5-1,5 мм з вуглецевої сталі;
- б) одноклітинні реверсивні для дресирування штаби з легованої сталі в кілька проходів;
- в) двоклітьові безперервні для дресирування тонкої штаби та жерсті (0,15-0,5 мм) у два проходи.

При дресируванні тонкої рулонної штаби з натягом забезпечуються не тільки обтискання металу, але й виправлення його розтягуванням, при якому натяг досягає межі плинності.

Дресирувальному способу піддають холоднокатані відпалені штаби з вуглецевих і низьколегованих сталей. Марки сталей:

- киплячі та напівспокійні: 08ПС, 08КП, 10КП, 10ПС, 15КП, 15ПС, 20КП, 20ПС, Ст0, Ст1КП, Ст1ПС, Ст2ПС;
  - нестаріюча сталь 08Ю;
  - спокійні сталі з нормальним вмістом марганцю: 10, 15, 20, 25, Ст3;
  - низьколеговані сталі: 10Г2, 16Г2, 09Г2Д та 10Х1ДП;
  - Леговані сталі: 25-30 ХГСА, 12Х2НВФА, 19Х2НВФА, 25Х2НВФА.
- Розміри штаби 0,5-2 x 850- 1400 мм.

Рулони після відпалу, попередньо очищені стисненим повітрям від піску та пилу, передаються за відомостями з термічного відділення в проліт дресирувальних станів. Метал виправляється в дресировання після остигання рулонів.

При дресированні особлива увага звертається на натяг штаби. Натяг штаби контролюється при постійній швидкості стану, за показаннями амперметрів, він повинен бути постійним протягом усього часу дресировання штаби. У разі утворення вузлів натягу на розмотувачі необхідно знизити швидкість.

Машини та агрегати прокатного цеху можна розділити на дві групи: машини та механізми головної лінії прокатного стану та машини, та агрегати потокових технологічних ліній цеху. Основне технологічне обладнання з короткими технічними характеристиками наведено в таблиці 1.1

Основним робочим органом прокатного стану є валок, що обертається в підшипнику, встановлений у робочій клітці. Привод валків здійснюється електродвигуном через проміжні передавальні механізми та пристрої. Машини і механізми, що використовуються для обертання валків, а також сприйняття зусиль, що виникають при пластичній деформації металу, і крутних моментів складають головну лінію прокатного стану. Робоча клітка є основним пристроєм прокатного стану, тому що в ній здійснюється власне прокатка (пластична деформація) металу.

Таблиця 1.1 – Перелік та основні характеристики механічного обладнання, що приймає участь в технологічному процесі

№ п/п	Вид обладнання	Тип, марка	Кількі., шт	Місце встановлення	Основні показники			
					Продуктивність	Загальна потужність	Габарити, м	Маса, т
1	2	3	4	5	6	7	8	9
<b>Вантажопідйомне обладнання:</b>								
1	Мостовий кран		30	по цеху	5/30 т		1 = 32	2
2	Мостовий кран		3	прокатн., терміч., дресир., відділення	80 т		1 = 32	84
3	Трансферкар		10	по цеху	120 т/год	16 кВт	2,5 x 6	8
<b>Транспортуюче обладнання:</b>								
1	Конвеєр гарячекатаних рулонів	КМР	2	трав. від.	250 т/год	275	3 x 600	600
2	Конвеєр, крокова балка		1	прокатн., терміч.	200 т/год	110	3 x 200	220
<b>Травильне відділення</b>								
	Безперервний травильний агрегат	БТА	1	травильне отд.	450 т/см	2300	10 x 72	1370
<b>Прокатне обладнання</b>								
1	Безперервний 4-х клітьовий стан 1680	Тандем	1	прокатне від.	150 Т/год	2945	1 = 24	1560
2	Реверсивний стан 1680		1	прокатне від.	30 Т/год	4500	1 = 12	400
3	Реверсивний стан 1200		1	прокатне від.	45 Т/год	7000	1 = 15	624
<b>Термічне обладнання</b>								
1	Ковпакові газові печі		195	термічне від.	40т/72 год	15	H = 6 d = 4	40
<b>Устаткування для дресування</b>								
1	Дресувальний стан 1700-1		1	дресувальне від.	66,5 т/год	6250	1 = 10	840
2	Дресувальний стан 1700-2		1	дресувальне від.	65 т/год	6300	1 = 10	885
<b>Ріжуче обладнання</b>								
1	Агрегат поперечного різання	АПР-1-3	3	дресувальне від.	40 т/год	2000	1 = 47	380
2	Агрегат поздовжнього різання	АПР-4	1	дресувальне від.				

Кліть являє собою дві масивні сталеві, литі станини, встановлені на плитах, прикріплені до фундаменту анкерними болтами. У станинах змонтовані подушки з підшипниками і валками, а також пристрої для переміщення верхнього валка по висоті та його осьової фіксації, що направляють проводки для металу та ін.

Прокатні валки виконують основну операцію прокатки – деформацію (обтиснення) металу та передання йому необхідних розмірів та форми поперечного перерізу.

У процесі деформації металу, валки, що обертаються, сприймають зусилля, що виникають при прокатки, передають його на підшипники та інші деталі робочої кліти стану.

Валок складається з трьох основних елементів: робочої частини – бочка валка, яка при прокатки безпосередньо стикається з металом, що деформується опорної частини – шийки, яка розташована з обох боків бочок і спираються на підшипники валка, приводного кінця валка. При обертанні валків, що здійснюється за допомогою універсальних шпинделів, приводний кінець валка роблять у вигляді плоскої лопаті (валки) або циліндричним для посадки на нього (на шпонці) втулок з лопаттю.

Валки листових станів служать для прокатки листів, штаби та стрічки. Бочка цих валків має циліндричну форму і іноді називають гладкими. При обточуванні на вальцетокарному верстаті бочку валків для гарячої прокатки тонких листів частину роблять трохи увігнутою з таким розрахунком, щоб при прокатках гарячого металу і великого розігріву, середня частина валків бочки стала циліндричною. Тоді товщина листа, що прокатується, буде однаковою по всій її ширині. І навпаки, бочку валків для холодної прокатки тонких листів роблять трохи опуклою: при прокатці, внаслідок великого вигину середньої частини валків у порівнянні з крайніми його частинами утворюча бочки в контакт з металом, що прокочується, стане циліндричною, і в цьому випадку

лист, що прокочується, так само буде правильних геометричних розмірів. по всій ширині.

Головний електродвигун прокатного стану є двигуном спеціального (металургійного) типу з повітряним охолодженням. Для станів з постійною швидкістю прокатки (чорнових клітей безперервних станів) застосовують синхронні (рідше асинхронні) електродвигуни. Для станів з регульованою швидкістю прокатки використовують електродвигуни постійного струму великої потужності (5–7 тисяч кВт), що живляться від спеціальних машин або тиристорних перетворювачів, часом від ртутних випрямлячів.

У чотириваловій кліті валки розташовані один над іншим: два робочі валки меншого діаметра (середні) і два опорні великого діаметра (крайні верхній і нижній) опорні валки призначені для збільшення жорсткості системи валків і робочої кліті в цілому. Стани з чотириваловими клітями набули широкого застосування для прокатки тонких і товстих листів і штаби.

Чотиривалкові кліті для прокатки рулонів використовують як нереверсивні в одноклітинних станах гарячої та холодної прокатки. У першому випадку перед кліттю встановлюють розмотувач рулонів, а за нею – моталку, що створює натяг штаби і намотує її на барабан. У другому випадку моталки встановлюють з обох боків кліті і прокатка відбувається по черзі в одному. То в іншому напрямі.

Робоча кліть складається з двох сталевих литих станин, що мають велику жорсткість, робочих та опорних валків з подушками, гідравлічних пристроїв для врівноваження верхніх валків та натискного механізму.

Станини з'єднані між собою траверсою та встановлені на плитовинах. Робочі валки обертаються у чотирирядних конічних роликів підшипниках. Опорні валки встановлені у підшипниках рідинного тертя.

Врівноваження верхнього опорного валка здійснюється гідравлічним циліндром, розташованим на верхній траверсі між станинами, за допомогою двох траверс, на кінці яких підвішені верхні подушки.

З обох боків валків встановлені плоскі проводкові столи, які призначені для подачі переднього кінця штаби у валки та створення та стягування при прокатках заднього кінця штаби (коли штаба повністю розмотана з рулону на моталки).

Станини робочих клітей – найвідповідальніші деталі прокатного стану. У них монтуються подушки валків стану, а також інші пристрої та механізми, що забезпечують задану точність прокатки і продуктивність стану. Усі зусилля сприймаються станинами. Тому при конструюванні та виготовленні станин особлива увага приділяється їх міцності та жорсткості.

За конструкцією станини ділять на дві групи: закрито та відкритого типу.

Станини закритого типу – лита масивна жорстка рама: у середині її зроблено вікно для встановлення у ньому подушок валків, внизу станина має припливи (лапи). У припливах передбачені отвори для болтів, якими станину кріплять до плит. Станина відкритого типу складається з двох частин: власне станини і кришки. Кришку скріплюють зі станиною болтами та клинами, що встановлені із затяжкою.

Ці станини характеризуються меншою жорсткістю порівняно зі станинами закритого типу, проте вони дешевші у виготовленні і дозволяють здійснити перевалку валків безпосередньо краном (вгору) при знятій кришці.

Розміри станин визначаються можливістю розміщення у вікні станини подушок валків та кінця натискного гвинта, а також необхідною міцністю та жорсткістю.

Верхню та нижню частини станини називають поперечниками, а бічні – стійками. Перетин стійок роблять зазвичай двотавровими або прямокутними. Стійки прямокутного перерізу легше відливати, внаслідок чого їх найчастіше застосовують.

Валки листових станів холодної прокатки за призначенням поділяються на дві групи: робочі та опорні.

Діаметр валка вибирають за результатами розрахунків, при яких

враховують сортамент прокату (насамперед його товщину), умови експлуатації, механічні властивості матеріалу, максимальні зусилля обтиснення та конструкцію стану.

Довжина бочки робочих валків залежить від ширини штаби, що прокочуються, листа, стрічки.

Зазвичай, привізними є робочі валки. У клітях з відношенням довжини бочки валка і діаметра, рівним або більшим 5:1, призначених для прокатки найтоншої стрічки з легованої сталі, а також багатовалкових станах виконують приводними опорні валки.

У валків, що працюють на великих підшипниках кочення, шийки іноді виконують ступінчастими; в станах з підшипниками ковзання шийки валків, як правило, гладкі. Для зниження тиску на підшипники та підвищення міцності шин валків, що працюють на підшипниках рідинного тертя, шийки мають максимальний діаметр, а місця переходу шийки в бочку – закруглені. Радіус заокруглення  $R_3 = (0,05 - 0,12) d$  м.

У робочих валках з діркою діаметром вище 160 мм часто виконують осьові канали. У великих валках ці канали в зоні бочки переходять у так звані камери з діаметром значно більшим, ніж вхідні отвори.

При виконанні осьових каналів видаляють пористу ліквіційну зону зливка, яка може стати джерелом концентратів напружень при загартуванні та експлуатації валка.

Основні канали використовують також для охолодження центральної зони валка при загартуванні; це забезпечує появу напруг стиснення поверхні осьового каналу. Додаткове охолодження робочих валків через осьовий канал у процесі експлуатації може сприяти створенню стабільності теплового режиму та підвищення стійкості валків.

Опорні валки виготовляють цільнокованими, литими, бондажованими. До якості обробки опорних валків висувають високі вимоги, такі як биття бочки опорного валка щодо шийок значною мірою визначає радіотовщинність штаби,

що покочується. Найбільше биття бочки щодо шийок валка діаметром 1500 мм дорівнює 0,03 мм.

Валки для станів холодної прокатки виготовляють із високоякісної сталі, що містять мінімальну кількість шкідливих домішок. Крім механічних властивостей, в термічно обробленому стані, ці сталі оцінюють за технічними характеристиками – гартування, прожарювання, схильності до перегріву, чутливості до деформації при загартуванні, оброблюваності та ін.

Найважливішими характеристиками сталей, що застосовуються для виготовлення валків, є твердість та прожарювання. Твердість сталі, марки 9X у загартованому стані сягає 100 одиниць по Шору. У таблиці 12 наведено залежність хімічного складу від марки сталі.

Таблиця 1.2 – Хімічний склад сталей, застосовуваних виготовлення робочих валків для станів холодної прокатки

Марка сталі	Зміст, %						
	C	Mn	Si	Cr	Mo	W	V
9X	0,8–0,95	0,2–0,35	0,25–0,45	1,4–1,7	–	–	–
9X2	0,85–0,95	0,2–0,35	0,25–0,45	1,7–2,1	–	–	–
9X2MΦ	0,85–0,95	0,2–0,35	0,25–0,45	1,4–1,7	0,2–0,3	–	0,1–0,2
9X2B	0,85–0,95	0,2–0,35	0,25–0,45	1,7–2,1	–	0,3–0,6	–
9X2CBΦ	0,85–0,95	0,2–0,35	1,3–1,6	1,7–2,1	–	0,3–0,6	0,1–0,2
60X2C	0,57–0,65	0,2–0,4	1,1–1,3	1,8–2,1	0,25–0,35	–	0,1–0,2
MΦ 9X Φ	0,85–0,95	0,2–0,35	0,25–0,45	1,4–1,7	–	–	0,1 – 0,25

Робочі валки багатовалкових станів, як правило, виготовляють зі сталей марок 9X і 9XΦ. За кордоном для їх виготовлення використовують інструментальні, середньолеговані і швидкорізальні сталі. Твердість робочої поверхні після термічної обробки досягає HRC 61–66.



В останні роки все більшого поширення набувають валки з металокерамічних твердих сплавів на основі карбїду вольфраму. Виготовлення валків із твердих сплавів здійснюють, як правило, гарячим пресуванням або згинанням пластифікованих заготовок. Кількість кобальтового порошку зазвичай приймають рівним 8–15% (решта WC).

Зносостійкість валків із твердих сплавів у 30–50 разів вища, ніж валків із легованої сталі. Крім цього, при прокатуванні в тонких валках можна отримати найвищий клас шорсткості поверхні стрічки, що прокочується.

Валки з твердих сплавів виготовляють цільними та складовими. Як робочі валки багато валкових атомів зазвичай застосовують цілісні металокерамічні валки. При розробці конструкцій валків з твердого сплаву передусім враховують певні співвідношення діаметрів шийки і бочки (не менше 0,6), і діаметра і довжини бочки (не більше 4).

Основним недоліком металокерамічних валків є підвищена крихкість, що унеможливує експлуатацію їх за наявності поштовхів, ударів, великих прогинів. При установці валків у кліті необхідно повністю усунути перекося, що впливають на якість металу, що прокочується. Опорні валки для станів холодної прокатки зазвичай виготовляють із сталей марок 9X2, 9XФ, 75ХМ, 65ХМ в останні роки сталь марки 75ХМ для виготовлення цільнокованих опорних валків набула найбільш широкого поширення.

Осі складових (бандажованих) опорних валків малих та середніх розмірів виготовляють із сталей марок 40ХНМА, 55Х, 50ХГ та сталей 70, для виготовлення осей великих опорних валків важко навантажених станів застосовують сталі марок 45ХНВ і 45ХМ.

Бандажі складових опорних валків виготовляють із сталей марок 9Х, 9ХФ, 75ХН, 9Х2, 9Х2Ф та 9Х2В, твердість поверхні бандажів після остаточної термічної обробки 60–85 одиниць Шору.

Доцільно застосовувати литі опорні валки, так як вони дешевші за ковани і в більшості випадків мають значно більшу зносостійкість. Великі литі опорні

валки виготовляють із хромонікельмолібденових сталей. Так, фірма «Wood Steel» (США) виготовляє опорні валки зі сталей типу 65ХНМА, які після термічної обробки мають твердість 45–60 одиниць за Шором.

Опорні валки багатовалкових станів холодної прокатки виготовляють, як правило, з інструментальної сталі, що містить 1,5% С і 12% Сг, твердість після термічної обробки HRC 50–62.

## 1.2 Огляд технічних рішень спрямованих на підвищення ефективності роботи валкового вузла дресирувального стану

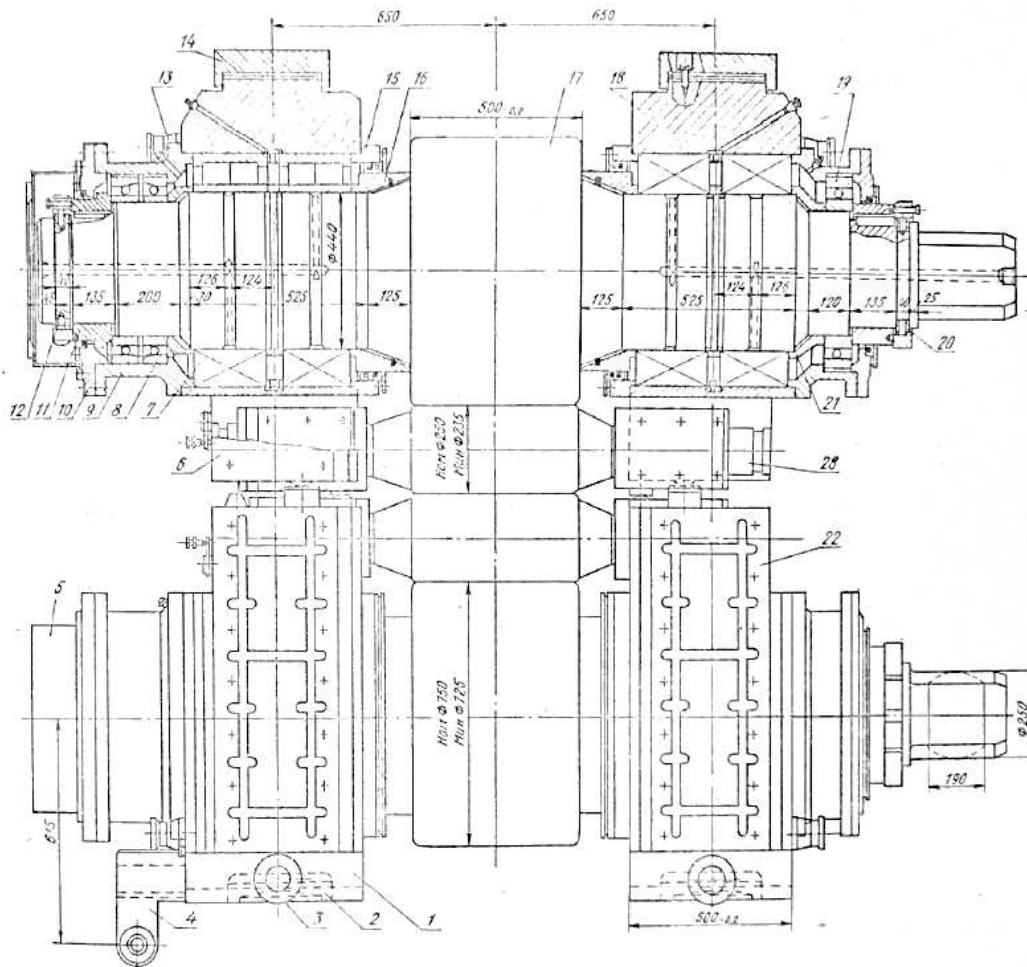
Вузол робочих валків є досить відповідальним механізмом робочої кліти, від ефективності роботи якого залежить якість кінцевого продукту. Відомі конструкції валкових вузлів хоч і показали себе як перевірені часом та виробництвом, але всеодно далекі від конструктивної досконалості та потребують подальшої розробки в напрямку їхньої модернізації.

На рисунку 1.1 представлена конструкція вузла валків товстолистового стану 3600. Так як контроль всіх технологічних параметрів має не маловажне значення, то зусилля на валки при прокатці вимірюється месдозами, розташованими між верхніми подушками і поперечинами станин.

Натискний пристрій в наведеному випадку – гідравлічний. Гідроциліндри нажимного пристрою розташовані в нижніх поперечках станин; плунжери циліндрів упираються в підшипники 2 внизу нижніх подушок 1.

Комплект опорних валків з подушками міняють за допомогою гідравлічного циліндра з великим ходом штока, циліндр розташований нижче рівня підлоги цеху; шток шарнірно з'єднується з важелем 4 нижньому подушки.

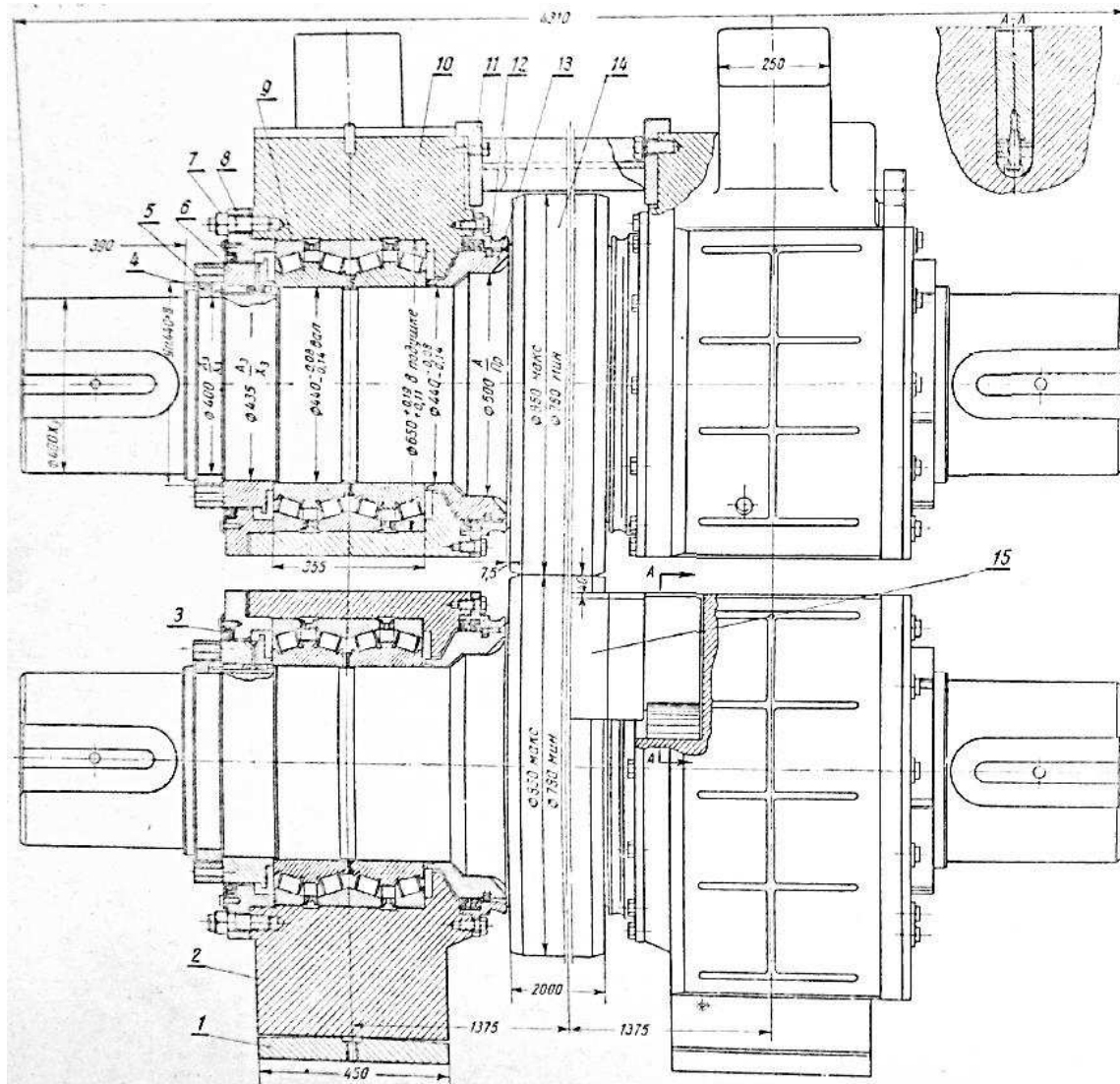
З неприводного боку робочої кліти подушки опорних валків фіксуються направляючими планками на стойках станин, подушки робочих валків фіксуються в подушках опорних валків за допомогою планок-фіксаторів, що повертаються руків'ям 23.



1 і 18 – подушки опорних валків : 2 – під'ятники плунжерів нижніх гідроциліндрів нажимного пристрою; 3 – катки; 4 – важіль; 5 – кожух; 6, 26, 27 – робочі валки з подушками, 7 – роликові підшипники радіальні; 8 – кулькові підшипники радіально-осьові; 9 – стакан; 10 кришка; 11 – втулка; 12 – гайка спеціальна; 13 – захват вантажопідйомний; 14 – п'ята; 15 – кришка; 16 – упорне кільце; 17 – валок опорний, 19 – шарикопідшипник; 20 – півкільця різьбові; 21 – кільце розпір; 22 – планка напрямна; 23 – руків'я фіксатора; 24 – конус; 25 гідроциліндрів розпору станин; 28 – валки робочі; 29 – проводка для підведення мастила; 30 – роликпідшипники конічні; 31 – кришка; 32 – втулка розпірна; 33 – втулка кінцева, 34 – п'ята, 35 – гідроциліндр противовигину робочих валків

Рисунок 1.1 – Вузол валків товстолистового стану 3600

На рисунку 1.2 зображений вузол валків чорнової кліті окалиноладача Швидкість прокатки 1 м/с. Загальний тиск металу на валки при прокатці 7 МПа. Крутний момент, на приводній шийці одного валка дорівнює 200 кН·м. У пазах нижніх подушок встановлені кінці проводок.



1 – підкладка; 2 – нижні подушки; 3–ущільнення; 4–кільце з двох половин; 5–гайка; 6 – кільце; 7 – шпилька; 8 – кришка; 9 – роликопідшипник; 10 – верхні подушки; 11 – траверси; 12–кришка; 13 – кільце; 14–валки; 15–проводка; 16–кришка; 17 – пробка конічна труба

Рисунок 1.2 – Вузол валків чорнової кліті окалиноламача дуо 850x2000

Валки з подушками міняють за допомогою муфти з противагою. Муфта забезпечена штирем, що фіксує верхню подушку (ліву) від провертання по відношенню до валка. Для цієї ж мети ліву верхню подушку скріплюють з правою за допомогою подовжньої зварної траверси.

Кліть – основний конструктивний елемент прокатного стану, що

складається з двох станин, які служать опорою для прокатних валків з підшипниками або для шестерінчастих валків.

Кліті прокатного стану мають наступну класифікацію:

- передчистова кліть – кліть, передуюча чистовsq, в якій прокат отримує форму і розміри, близькі до форми і розмірів готового виробу;
- робоча кліть – основний елемент головної лінії прокатного стану, що включає пристрої для розміщення, регулювання і закріплення прокатних валків; для деформації металу в прокатних валках.
- реверсивна кліть – кліть, конструкція якої передбачає можливість зміни, напрямку обертання валків;
- універсальна кліть – робоча кліть з горизонтальними, і вертикальними валками для обтискання металу в двох взаємно перпендикулярних напрямках; для прокатки широкополочних балок і штаби (у чорновій групі напівбезперервного стану гарячої прокатки);
- чорнова кліть – кліть, в якій здійснюють початкову стадію прокатки;
- чистова кліть – кліть, в якій здійснюють завершальну, стадію прокатки; шестерінчаста клеть – елемент головної лінії прокатного стану, що включає два шестерінчасті валки з рівним числом зубів; для розділення крутного моменту, що передається від валу головного електродвигуна або редуктора на прокатні валки [5].

Аналіз роботи дресирувального стану 1700 показав, що найбільш проблемними місцями лінії є валкові вузли, а саме підшипникові опори. Відмова в роботі робочих клітей призводить до аварійних зупинок процесу прокатки та відставання від технологічного графіку цеху в цілому.

У вітчизняній практиці рішення з модернізації робочих клітей в основному направлені не на підвищення надійності підшипникових вузлів валків, а на зміні конструкції цих вузлів.

Авторським патентом [6] пропонується вирішення проблеми забезпечення самовстановлення подушок в горизонтальній площині при прокатці з натягненням, що як було вже сказано вище, є важливим для процесу дресирування металу.

Вказана мета досягається тим, що у вузлі подушок робочих і опорних валків клітей кварто прокатного стану, що містить подушки робочих валків, встановлених з можливістю їх осевого переміщення в розточуваннях подушок опорних валків, що мають бічні установчі поверхні, виконані по площинах, розташованих під кутом до їх осей, площини бічних установчих поверхонь подушок опорних валків при їх продовженні перетинаються з віссю прокатки в точках, зміщених на першій по ходу прокатки кліті прокатного стану у напрямі моталки, а на подальших клітях – у напрямі розмотувача.

Кут нахилу площини настановних поверхонь до осі складає  $2,5-3,5^\circ$ , а поверхні подушок робочих валків, що сполучаються з ними, виконані у вигляді частини многогранника, що складається не менше, ніж з трьох граней, де кут вершини дорівнює  $175-178^\circ$ .

На рисунку 1.3 зображений вузол подушок робочого і опорного валків однієї з клітей безперервного стану; на рисунку 1.4 – профілі поперечного перерізу подушки робочого валка і накладок подушки опорного валка.

Пропонований вузол подушок робочого і опорного валків містить робочий валок 1, на цапфі якого встановлений підшипник 2 кочення, поміщений в корпус подушки 3 робочого валка, ліву 4 і праву 5 накладок на бічних опорних поверхнях подушки 3 робочого валка. Накладки мають багатогранні бічні зовнішні поверхні, що складаються не менше, чим з трьох граней, і прикріплені до бічних опорних поверхонь подушки 3 болтами 6. Накладки 7 і 8 на бічних поверхнях отворів подушки опорного валка 9 мають клинову форму, причому продовження площин накладок перетинають вісь прокатки з боку розмотувача. Голівки 10 фіксаторів, розташованих в подушках опорних валків 9, зменшені по висоті на 400 мм, що створює можливість осевого переміщення і обертання

подушки 3 робочого валка 1 в процесі роботи стану. Профіль поперечного перерізу накладок 4 і 5 на бічних опорних поверхнях подушки 3 робочі валки 1 має три ділянки: а, b, с – для лівої накладки і ділянки а<sub>1</sub>, b<sub>1</sub>, і с<sub>1</sub> – для правої 5. Ділянки b і b<sub>1</sub>, мають рівні кути нахилу до осі робочого валка і прийняті в цій конструкції рівними 3°, а кути між продовженнями середньої грані b і b<sub>1</sub> і гранями а і с<sub>1</sub>а<sub>1</sub>, що примикають до них, і с<sub>1</sub> можуть бути від 2 до 5°. Накладки 7 і 8 на бічних поверхнях отворів подушок опорних валків 9 мають форму плоских усічених клинів, у яких вершини спрямовані в різні боки від осі стану, а кут нахилу при вершині клину дорівнює 3°. Направляючі поверхні подушок опорних валків виконані таким чином, що їх продовження перетинають вісь прокатки в точках, зміщених у напрямі максимального горизонтального зусилля, що діє на смугу.

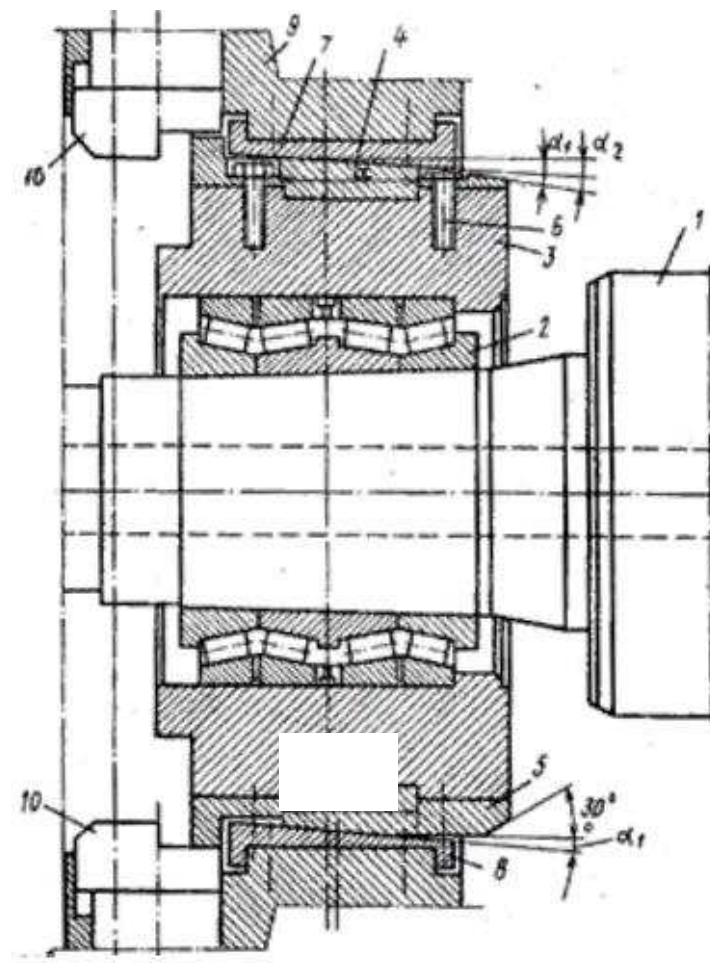


Рисунок 1.3 – Вузол подушок робочого і опорного валків однієї з клітей безперервного стану

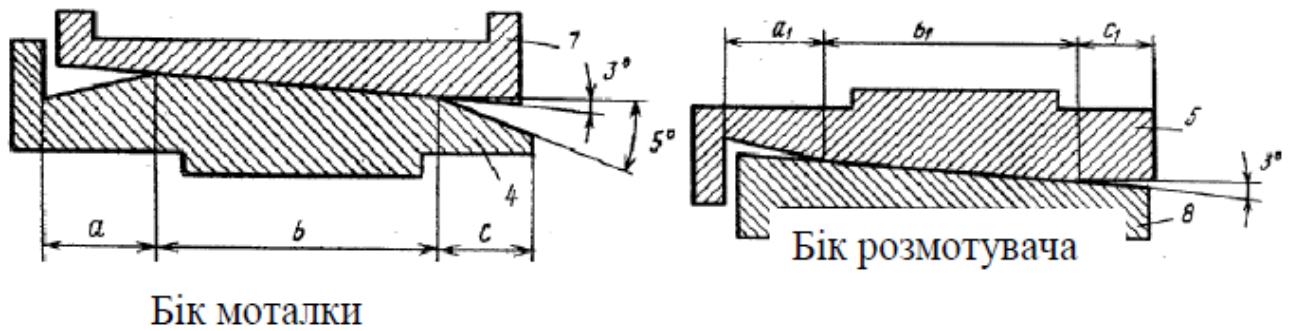


Рисунок 1.4 – Профіль поперечного перерізу подушки робочого валка і накладок подушки опорного валка

В процесі прокатки робочий валок прогинається в горизонтальній площині у напрямі максимального зусилля, Цьому прогину відповідає деякий кут повороту його цапфи із закріпленим на ній підшипником 2 і подушкою 3, Під впливом цих деформацій подушка робочого валка обертається і в контакт з опорною площиною вступають грані  $b$  і  $b_1$ . При змінах величини горизонтального зусилля прогин валка, а отже і кут повороту його осі, змінюється ( $2-5^\circ$ ) і в контакт з опорною площиною вступають грані  $c$  і  $c_1$  або  $a$  і  $a_1$  залежно від того, зменшилося або збільшилося первинне зусилля. Оскільки площини граней  $c$  і  $c_1$  і  $a$  і  $a_1$ , розташовані під кутом  $2-5^\circ$  до площин середніх граней  $b$  і  $b_1$ , перешкод додатковим поворотам подушки робочого валка з боку подушки опорного валка не виникає. Цим виключається заклинювання підшипників, т.ч., забезпечується самовстановлення.

Усунення осьових проміжків в опорному вузлі роботою [7] досягається тим, що опорний вузол, переважно для заздалегідь напружених клітей, виконаний у вигляді підшипника рідинного тертя, що містить подушку, втулку вкладиш, встановлену в поворотній ексцентриковій втулці, забезпечену приводом радіального регулювання розчину валків, і групу радіально-упорних підшипників кочення, забезпечений різьбовим складеним стаканом, в який встановлена група радіально-упорних підшипників, а поворотна ексцентрикова



втулка виконана роз'ємною, причому лінія роз'єму ексцентрикової втулки і складений стакан розташований в один площині.

Опорний вузол прокатного валка працює наступним чином (рисунок 1.5). При складанні в подушку 1 встановлюється складена ексцентрикова втулка 2, привод 3 радіального регулювання валка і закривається кришкою.

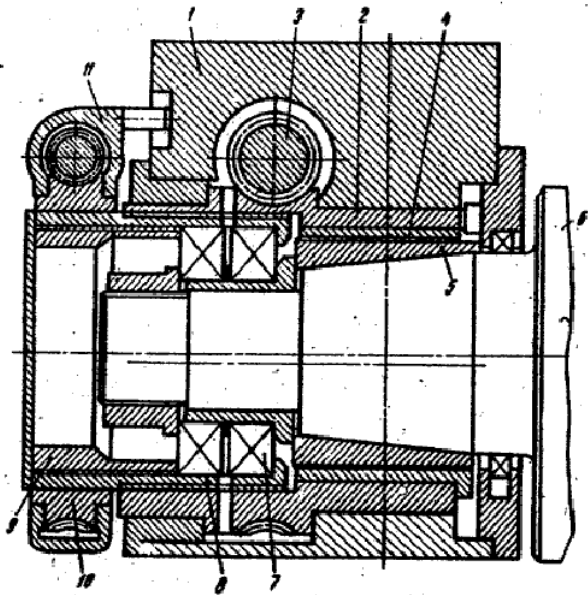


Рисунок 1.5 – Опорний вузол прокатного валка

У ексцентрикову втулку 2 встановлюються втулка-вкладиш і втулка-цапфа 5 підшипника рідинного тертя. Укручується складений різьбовий стакан 8, на кінцеву частину якого монтується зубчаста передача 10 з корпусом 11, а сухар входить в паз торця подушки. У складений різьбовий стакан встановлюється група упорних підшипників 7 і заздалегідь зачіпляється різьбовою втулкою 9. Зібрана подушка встановлюється на шийку валка і закріплюється, після цього виконується остаточна установка осьової "гри" валка різьбовою втулкою 9. При цьому вибираються осьові проміжки в доріжках підшипників кочення, в різьбах складеної різьбового стакану і складеної ексцентрикової втулки, а також осьові проміжки між упорними поверхнями складеної ексцентрикової втулки, подушкою, кришкою упорного вузла.

Радіальне регулювання здійснюється поворотом складеної ексцентрикової втулки приводом регулювання розчину валків.

Осьове регулювання здійснюється поворотом складеного різьбового стакану із зубчастою передачею.

Запропонований опорний вузол прокатного валка забезпечує радіальне регулювання валка, а також підвищує точність його регулювання в осьовому напрямі. Зміщення радіальної і осьової регулювань в одному опорному вузлі прокатного валка дозволяє спростити складання клітей при установці обох валків в ексцентрикові втулки з синхронізуючою передачею тобто отримати симетричне радіальне регулювання обох валків відносно осі прокатки. Виконання ексцентрикової втулки складеною дозволяє зменшити осьову гру валка, що зменшує різновтовщинність прокату по довжині.

Зубчаста передача осьового регулювання валка, що самостійно гальмує, дозволяє безперервно регулювати осьове його положення, що безпосередньо веде до підвищення точності геометричних розмірів прокату.

Багато роботи прикладного характеру в напрямку дослідження прокатного обладнання в сучасні Україні виконано професором кафедри обробки металів тиском Запорізької державної інженерної академії Ніколаєвим В. О. [1,4, 8-11]. Але всі всі ці роботи, окрім [9] направлені здебільшого на дослідження технологічних процесів і в напрямку удосконалення прокатного обладнання носять лише оглядовий характер.

Удосконаленню підшипників кочення та їхньому розрахунку та обслуговуванню присвячено роботу [12], але вона дає знання здебільшого в області загального машинобудування і не торкається технологічних нюансів, пов'язаних безпосередньо з прокаткою штабового матеріалу.

Детальний аналіз всіх вищезгаданих робіт дає можливість зробити висновок, що основний напрямок модернізації вузла підшипникових опор робочих валків прокатної кліті – це кардинальна зміна всієї конструкції, що в умовах діючого виробництва не завжди є доцільним та можливим, тому в роботі

поставлена задача оптимізації конструкції вузла прокатної кліті з мінімально можливими втратами робочого часу, пов'язаними з їхнім впровадженням у виробничий агрегат.

### 1.3 Пропозиції щодо модернізації обладнання та обґрунтування обраного напрямку

Одним із відводальних вузлів, що забезпечують точність прокатки на безперервних широкоштабових станах, а також дресировальних чотирьохвалкових станах 1700 є підшипниковий вузол валка.

На сьогодні з точки зору конструктивного виконання на опорних валках стану 1700 використовуються підшипники рідкісного тертя, які є невибагливі та досить надійні в роботі, за умови виконання технічних умов їхнього обслуговування.

В якості опор робочих валків використовуються чотирьохрядні конічні роликові підшипники кочення 77779, які з огляду інтенсифікації виробничих процесів, почали проявляти себе з досить негативного боку, потребуючи більш прискіпливої уваги механослужби та досить частої заміни, задля уникнення аварійних простоїв обладнання.

Тому пропонується з метою підвищення надійності та довговічності підшипникового вузла робочого валка виконати заміну підшипник кочення 77779 на більш сучасний та надійний підшипник ВТ4В 332824/НА1 фірми SKF.

Це дозволить підвищити несучу здатність вузла, а також зменшити час тривалості ремонтів, що відповідно знизить вартість і підвищить продуктивність агрегату й прокатного стану в цілому [13].

Для виконання запропонованої модернізації необхідно виконати розрахунок основних конструктивних елементів прокатної кліті та виконати дослідження залежності моменту опору, який виникає у підшипнику, від різних виробничих факторів, чому і буде присвячена дослідницька частина цієї роботи.

## 2 РОЗРАХУНКОВА ЧАСТИНА

### 2.1 Вибір електродвигуна приводу кліті дресирувального стану 1700

Приймаємо з інструкції на дресирувальний стан 1700-1 комбінату Запоріжсталь:

– момент праведений –  $M_{пр} = 14,3$  кН.

Оскільки привод валків індивідуальний, то отримана величина крутного моменту відноситься до одного валку. Визначаємо споживану потужність електродвигуна за заданих умов прокатки. Момент сил тертя у підшипниках опорних валків (ПРТ), приведений до робочих валків складає:

$$M_{Тр1} = P f_n d_{оп} \frac{D_p}{D_{оп}}; \quad (2.1)$$

де  $d_{оп}$  – діаметр шийки опорних валків з урахуванням втулки насадки, м;

$D_p, D_{оп}$  – відповідно діаметр робочих та опорних валків, мм;

$P$  – зусилля прокатки  $P = 5000$  кН

$f_n$  – Коефіцієнт прокатки [14]:

$$M_{тр1} = 5000 \cdot 0,003 \cdot 0,2 \cdot \frac{500}{1300} = 1,15 \text{ кН} \cdot \text{м}$$

Знаходимо момент додаткових сил тертя в передавальних механізмах головної лінії кліті [15]:

$$M_{тр2} = \left( \frac{1}{\eta_{\Sigma}} - 1 \right) \cdot (M_{пр} + M_{тр1}) = \left( \frac{1}{0,95} - 1 \right) \cdot (14,3 + 1,15) = 0,8655 \approx 1 \text{ кН} \cdot \text{м} \quad (2.2)$$

Підсумовуємо складові крутного моменту, і приводимо їх до валів двигунів ( $i=1$ ):

$$M_{дв.ном} = \frac{M_{пр} + M_{тр1} + M_{тр2}}{i} = \frac{14,3 + 1 + 1,15}{1} = 16,45 \text{ кН} \cdot \text{м} \quad (2.3)$$

Знаходимо момент холостого ходу:

$$M_{x.g.} = 0,05 M_{дв.ном.} = 0,05 \cdot 16,45 = 0,823 \text{ кН} \cdot \text{м} \quad (2.4)$$

Статичний момент на валу двигуна [16]:

$$M_{дв} = M_{дв. ном.} + M_{x.x} = 16,45 + 0,823 = 17,273 \text{ кН} \cdot \text{м} \quad (2.5)$$

Визначаємо швидкість прокатки [8]:

$$\delta = v \frac{h_1}{h_0} = 20 \frac{0,5}{2} = 5,2 \text{ м/с} \quad (2.6)$$

де  $h_0$  – товщина листа до прокатки;

$h_1$  – товщина металу після прокатки;

$v$  – швидкість 20 м / с.

Знаходимо кутову швидкість на валу двигуна:

$$\omega_{дв} = \omega \cdot i = \frac{U}{R} \cdot i = \frac{5,2 \cdot 1}{0,2} = 29,4 \text{ с}^{-1} \quad (2.7)$$

Потужність (без урахування ККД двигунів) складе:

$$N_{дв} = M_{дв} \cdot \omega_{дв} = 17,273 \cdot 29,4 = 507,8 \approx 508 \text{ кВт} \quad (2.8)$$

По отриманій потужності вибираємо двигун [17]:

Тип	4П –450–36–600–УЗ
Потужність	660 кВт
Частота обертання	$n = 400/1000$
Момент інерції	$M_u = 51,0 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$

## 2.2 Визначення крутного моменту та потужності двигуна електроприводу натискного механізму

Для приведення в обертання натискного гвинта, коли на нього (по поверхні п'яти) діє тиск, до верхнього кінця натискного гвинта необхідно додати певний крутний момент, який можна підрахувати за формулою [18]:

$$M_B = P_B \left[ \mu_n \frac{d_n}{3} + \frac{d_{CP}}{2} \operatorname{tg}(\psi + \varphi) \right] \quad (2.9)$$

де  $P_B$  – зусилля, що діє на натискний гвинт;  $P_B = 6,1 \text{ МН}$ ;

$d_n$  – діаметр п'яти натискного гвинта;  $d_n = 0,390 \text{ м}$ ;

$\mu_n$  – коефіцієнт тертя в п'яті;  $\mu_n = 0,10$ ;

$d_{CP}$  – середній діаметр різьблення натискного гвинта;

$\psi$  – Кут підйому гвинтової лінії;  $\psi = 0,429^\circ$ ;

$\varphi$  – Кут тертя в різьбленні, що визначається за формулою [19]

$$\varphi = \operatorname{arctg}\left(\frac{f}{\cos \gamma}\right) \quad (2.10)$$

де  $f$  – коефіцієнт тертя у різьбленні між натискною гайкою та гвинтом;  $f = 0,04$ ;

$\gamma$  – Кут профілю нахилу різьблення;  $\gamma = 15^\circ$ ;

$$\varphi = \operatorname{arctg}\left(\frac{0,04}{\cos 15^\circ}\right) = 2,37^\circ \quad (2.11)$$

У тонколистових станах верхній валок встановлюють під час процесу прокатки, тобто при повному тиску металу на валки. І тут однією натискний гвинт діятиме зусилля, рівне половині тиску при прокатці, тобто [20]:

$$M_B = 6,1 \left[ 0,10 \frac{0,390}{3} + \frac{0,425}{2} \operatorname{tg}(0,429^\circ + 2,37^\circ) \right] = 0,1426 \text{ МН} \cdot \text{м} \quad (2.12)$$

Визначивши момент, що крутить, потрібний для обертання натискного гвинта, можна потім визначити і потужність двигуна, необхідну для приводу всього настановного механізму. Внаслідок того, що швидкість переміщення натискного гвинта задана, момент двигуна, що крутить, для приводу гвинта можна визначити за формулою

$$M_{\text{дв}} = \frac{M_B}{i \cdot \eta} \quad (2.13)$$

де  $i$  – передавальне число приводу від двигуна до гвинта,  $i = 1026$

$\eta$  – ККД передачі від двигуна до гвинта,  $\eta = 0,70$

$$M_{\text{дв}} = \frac{0,1426}{1026 \cdot 0,70} = 0,198 \text{ кН} \cdot \text{м}$$

Потужність двигуна дорівнюватиме:

$$N_{\text{дв}} = M_{\text{дв}} \cdot \omega_{\text{дв}}, \quad (2.14)$$

де  $\omega_{\text{дв}}$  – кутова швидкість 1/с;

$n_{\text{дв}}$  – число обертів двигуна,  $n_{\text{дв}} = 565 \text{ об/мин}$

$$\omega_{\text{дв}} = \frac{\pi}{30} n_{\text{дв}}, \quad (2.15)$$

$$\omega_{\text{дв}} = \frac{3,14 \cdot 565}{30} = 59,13 \text{ хв}^{-1}$$

$$N_{\text{дв}} = 0,198 \cdot 59,13 = 11,7 \text{ кВт}$$

Для приводу натискних гвинтів [21] встановлені два електродвигуни типу ДП –62 загальною потужністю 2х46 кВт;  $n_{\text{дв}} = 565 \text{ об/хв}$ ;  $n_{\text{МАХ}} = 1800 \text{ об/хв}$ ;  $m = 1850 \text{ кг}$ ;  $M_{\text{МАХ}} = 1912 \text{ Н} \cdot \text{м}$

### 2.3 Аналіз роботи натискного механізму за умови виходу з ладу одного з двигунів та погіршеним змащуванням гвинтової пари

Вихідні дані до розрахунку:  $P_{\text{в}} = 6,1 \text{ МН}$ ;  $d_{\text{п}} = 0,390 \text{ м}$ ;  $\mu_{\text{п}} = 0,10$ ;  
 $d_{\text{сп}} = 0,425 \text{ м}$ ;  $\psi = 0,429^{\circ}$ ;

$f$  – коефіцієнт тертя у різьбленні між натискною гайкою та гвинтом;

$$f = 0,14; \gamma = 15^{\circ};$$

$$\varphi = \arctg\left(\frac{0,16}{\cos 15^{\circ}}\right) = 8,24^{\circ}$$

Тоді крутний момент дорівнюватиме:

$$M_{\text{в}} = 6,1 \left[ 0,10 \frac{0,390}{3} + \frac{0,425}{2} \text{tg}(0,429^{\circ} + 8,24^{\circ}) \right] = 0,27 \text{ МН} \cdot \text{м}$$

Визначивши крутний момент, потрібний для обертання натискного гвинта, можна потім визначити і потужність двигуна, необхідну для приводу всього



настановного механізму. Внаслідок того, що швидкість переміщення натискного гвинта задана, момент двигуна, що крутить, для приводу гвинта можна визначити за формулою:

$$M_{\text{дв}} = \frac{2 \cdot M_{\text{в}}}{i \cdot \eta} \quad (2.16)$$

де  $i$  – передавальне число приводу від двигуна до гвинта,  $i = 1026$

$\eta$  – ККД передачі від двигуна до гвинта,  $\eta = 0,70$

$$M_{\text{дв}} = \frac{2 \cdot 0,27}{1026 \cdot 0,70} = 0,77 \text{ кН} \cdot \text{м}$$

$$N_{\text{дв}} = 0,77 \cdot 59,13 = 45,6 \text{ кВт}$$

Аналіз виконаних розрахунків вказує на те, що робота натискного механізму при одному робочому двигуні та погіршеному змащуванні гвинтової пари можлива.

#### 2.4 Розрахунок підшипникових опор робочого валка

Для опори вала використано чотирьохрядний конічний роликовий підшипник кочення 77779 з параметрами 395×545×283мм,  $C=3161\text{кН}$ ,  $C_0=9360\text{кН}$ , гранична частота обертання  $n_{\text{пл}}=630 \text{ хв}^{-1}$ . Розрахунки ведемо за максимальним навантаженням [22],  $R_{\text{МАХ}}=P/2=10,5 \cdot 10^6/2=5,25 \cdot 10^6\text{Н}$ .

Підшипники піддаються впливу навантаження, величина і характер якої змінюється так само, як і зусилля прокатки.

Еквівалентне навантаження визначається за формулою:

$$Q_E = (k_K \cdot R_{\max} + m \cdot A_{\max}) \cdot k_e, \text{ кН}, \quad (2.17)$$

де  $R_{\max}$  – максимальне радіальне навантаження на підшипник,

$A_{\max}$  – максимальне осьове навантаження;

$m$  – коефіцієнт, який враховує неоднаковий вплив радіального та осьового навантажень на термін служби підшипника;

$k_K$  – коефіцієнт, що враховує залежність терміну служби підшипника від того, яке кільце обертається щодо вектора навантаження;

$k_e$  – коефіцієнт, що враховує непостійність дії максимального навантаження

$$Q_E = (1 \cdot 5250 + 0,24 \cdot 0) \cdot 0,12 = 630 \text{ кН}.$$

Розрахункова довговічність:

$$L = \left( \frac{C_0}{Q_E \cdot k_\sigma \cdot k_T} \right)^3, \text{ млн. об}, \quad (2.18)$$

де  $C_0$  – коефіцієнт, що характеризує працездатність підшипника (динамічна вантажопідйомність) [23];

$k_\sigma$  – коефіцієнт, що враховує вплив характеру навантаження на термін служби підшипника;

$k_T$  – коефіцієнт, що враховує вплив температурного режиму роботи,

Відповідно до рекомендацій, для прокатних валків характерні наступні значення коефіцієнтів [9]:  $k_K=1$ ,  $k_\sigma=3$ ,  $k_T=1,1$ .

Тоді:

$$L = \left( \frac{9360}{630 \cdot 3 \cdot 1,1} \right)^3 = 912 \text{ млн. об}.$$

Довговічність [24]:

$$L_h = \frac{L \cdot 10^6}{60 \cdot n}, \text{ год.}, \quad (2.19)$$

де  $n=630 \text{ хв}^{-1}$  – частота обертання підшипника;

$$L_h = \frac{912 \cdot 10^6}{60 \cdot 630} = 24127 \text{ год.}$$

Розрахуємо обрані для модернізації підшипники за аналогічною методикою.

Чотирьохрядні конічні роликові підшипники кочення ВТ4В 332824/НА1 фірми SKF з параметрами  $395 \times 545 \times 289 \text{ мм}$ ,  $C=3910 \text{ кН}$ ,  $C_0=9500 \text{ кН}$ , гранична частота обертання  $n_{пл}=630 \text{ хв}^{-1}$  [25].

Еквівалентне навантаження визначається за формулою:

$$Q_E = (k_k \cdot R_{\max} + m \cdot A_{\max}) \cdot k_e, \text{ кН,}$$

де  $R_{\max}$  – максимальне радіальне навантаження на підшипник,

$A_{\max}$  – максимальне осьове навантаження,  $A_{\max}=0$ ;

$m$  – коефіцієнт, який враховує неоднаковий вплив радіального та осьового навантажень на термін служби підшипника;

$k_k$  – коефіцієнт, що враховує залежність терміну служби підшипника від того, яке кільце обертається щодо вектора навантаження;

$k_e$  – коефіцієнт, що враховує непостійність дії максимального навантаження

$$Q_E = (1 \cdot 5250 + 0,24 \cdot 0) \cdot 0,12 = 630 \text{ кН.}$$

Розрахункова довговічність:

$$L = \left( \frac{C_0}{Q_E \cdot k_\sigma \cdot k_T} \right)^3, \text{ млн. об,}$$

де  $C_0$  – коефіцієнт, що характеризує працездатність підшипника (динамічна вантажопідйомність);

$k_\sigma$  – коефіцієнт, що враховує вплив характеру навантаження на термін служби підшипника;

$k_T$  – коефіцієнт, що враховує вплив температурного режиму роботи,

Відповідно до рекомендацій, для прокатних валків характерні наступні значення коефіцієнтів [9]:  $k_K=1$ ,  $k_\sigma=3$ ,  $k_T=1,1$ .

$$L = \left( \frac{9500}{630 \cdot 3 \cdot 1,1} \right)^3 = 954 \text{ млн. об.}$$

Довговічність:

$$L_h = \frac{L \cdot 10^6}{60 \cdot n}, \text{ год.}, \quad (2.47)$$

де  $n=630 \text{ хв}^{-1}$  – частота обертання підшипника;

$$L_h = \frac{954 \cdot 10^6}{60 \cdot 630} = 25238 \text{ год.}$$

Порівнявши результати розрахунків підшипників кочення підтверджують правильність рішення по модернізації кліті шляхом заміни підшипників 77779 на підшипники ВТ4В 332824/НА1 фірми SKF в яких за однакових умов експлуатації розрахунковий ресурс довговічності більший на 5 %. Для збільшення виробничого ресурсу необхідно експериментальним шляхом встановити залежності моменту опору обертанню в залежності від схеми встановлення підшипника.

### 3 ДОСЛІДНО–ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ЧАСТИНА

#### 3.1 Спрощена методика визначення моменту опору обертанню підшипників кочення

Підшипники кочення служать для кріплення валів і осей у корпусах машин. Їх використовують у побутових приладах, автомобілях, аерокосмічних системах. Від якості підшипників залежить працездатність машин: продуктивність, точність, безшумність, довговічність і ін. Підшипники кочення постійно модернізуються: поліпшується їх конструкція, технологія й експлуатація [26].

Основною робочою характеристикою підшипника є коефіцієнт корисної дії (ККД). Як складова частина загального ККД машини він використовується при розрахунках потужності привода. Значення ККД пов'язане з опором обертанню підшипника, яке залежить від конструкції, точності й чистоти поверхонь деталей, навантаження, типу змащення й ін. Заміна тертя ковзання тертям кочення дозволяє зменшити опір у підшипниках при середніх частотах обертання в 3–6 раз і в 10–15 раз при пуску [27].

Підшипник складається із зовнішнього й внутрішнього кілець, кульок і сепаратора для рівномірного розподілу їх по колу між кільцями (рисунок 3.1). На поверхні кілець є доріжки кочення, по яких перекочуються тіла кочення при обертанні одного з кілець.

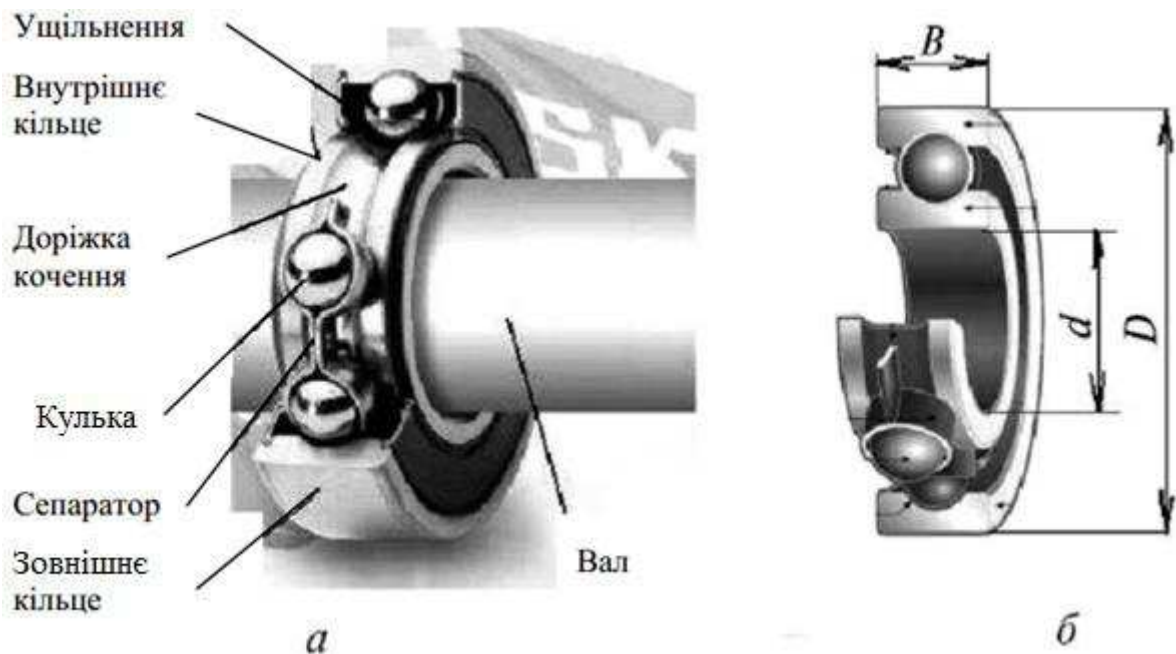
У технічній літературі [12] момент опору обертанню визначається по спрощеній формулі при деяких умовах: навантаження на підшипник  $P \approx 0,1 C$ ; гарне змащування; нормальні умови експлуатації:

$$M_{\text{ПД}} = F_E \cdot f \cdot \frac{d}{2} \quad (3.1)$$

де  $F_E$  – приведене навантаження;

$f$  – приведений коефіцієнт тертя;

$d$  – внутрішній діаметр підшипника.



а – з ущільненнями

б – без ущільнень

Рисунок 3.1 – Підшипники шарикові радіальні однорядні

При необхідності більш точних розрахунків виникають труднощі, обумовлені особливостями роботи підшипника. Наприклад, на величину опору обертанню підшипника може впливати невеликий перекіс кільця. Це приводить до зсуву кульок і нерівномірності їх обертання, що викликає проковзування точок контакту щодо бігових доріжок і гнізд сепаратора. Можливі також автоколивання кульок через похибки їх діаметрів або биттю доріжок кочення, бічних і радіальних. Ці й інші явища, властиві роботі підшипників, носять випадковий характер і перешкоджають точному аналітичному розв'язку.

Існує також уточнений розрахунок моменту тертя підшипника кочення, який полягає в тому, що момент тертя ділиться на незалежний від навантаження момент  $M_0$  і залежний від навантаження момент  $M_1$ , які потім складаються й дають сумарний момент:

$$M_{\text{ПД}}=M_0+M_1, \quad (3.2)$$

де  $M_0$  – незалежний від навантаження момент;

$M_1$  – залежний від навантаження момент.

Це «класична» методика розрахунків підшипників, яку на сучасному етапі провідні виробники підшипників удосконалили, а в деяких моментах переглянули заново.

### 3.2 Огляд прогресивних методик визначення моменту тертя підшипників кочення

На сучасному етапі розвитку технологій багато міжнародних виробників підшипникових вузлів: шведська компанія SKF, німецька компанія Schaeffler, японські компанії KSM, GMB Corporation Japan, NSK, американська компанія Timken, французька компанія SNR Group (виробник підшипників №1 для автомобілебудування в Європі) і багато інших світових лідерів з виробництва підшипникових вузлів і обертових опор, використовують більш передові методики розрахунків моменту тертя підшипників кочення.

Точність розрахунків можна підвищити, якщо в основу уточнюючого розрахунку моменту тертя підшипника кочення покласти не залежність від навантаження, а тип джерела тертя. По суті, до  $M_0$  можна віднести додаткові зовнішні джерела тертя разом з «гідродинамічним» компонентом тертя кочення, який також має залежну від навантаження складову.

Цей новий підхід виявляє джерела тертя в кожному контакті, що виникає в підшипнику, і їх комбінації; крім того, з метою прогнозування загального моменту тертя в міру додавання ущільнень і додаткових зовнішніх джерел тертя до загальної суми можна додавати нові доданки. Оскільки ця модель ураховує всі контакти без винятку (включаючи доріжки кочення та борти), є можливість

внесення виправлень, що відбивають конструктивні зміни й поліпшення поверхонь підшипників.

Нова модель, розроблена SKF [28], забезпечує більш точний розрахунок моменту тертя, що виникає в підшипниках кочення. Нова модель SKF була виведена з більш складних обчислювальних моделей SKF і забезпечує обчислення приблизних номінальних величин для наступних робочих умов:

- змазування пластичним змащенням або з використання таких традиційних способів змащування мастилом, як масляна ванна, крапкове змащення й упорскування мастила;
- для спарених підшипників потрібно здійснити розрахунок моменту тертя для кожного підшипника окремо, а потім скласти отримані величини; радіальне навантаження ділиться нарівно між двома підшипниками; осьове навантаження ділиться залежно від типу підшипникового вузла;
- величина навантаження рівна або перевищує величину рекомендованого мінімального навантаження;
- постійні навантаження по величині й напрямку;
- нормальний робочий зазор у підшипнику.

Для розуміння потреби проведення експеримента наведемо принципи розрахунків розроблених компанією SKF. Для точного розрахунків моменту тертя в підшипнику кочення повинні бути враховано чотири різні джерела:

$$M = M_r + M_{sl} + M_{seal} + M_d, \quad (3.3)$$

де  $M$  – загальний момент тертя;

$M_r$  – момент тертя кочення;

$M_{sl}$  – момент тертя ковзання;

$M_{seal}$  – момент тертя ущільнень;

$M_d$  – момент тертя за рахунок опору змащення, збовтування, розбризкування та ін.



Розпишемо складові моменту тертя в підшипнику.

Розрахунки моменту тертя кочення здійснюються по формулі:

$$M_r = G_r \cdot (v \cdot n)^{0,6}, \quad (3.4)$$

де  $M_r$  – момент тертя катання;

$G_r$  – змінна, що залежить від:

- типу підшипника;
- середнього діаметра підшипника  $d_m = 0,5 (d + D)$ ;
- радіального навантаження  $F_r$ ;
- осьового навантаження  $F_a$ ;

$n$  – частота обертання;

0,6 – кінематична в'язкість мастильного матеріалу при робочій температурі, (для пластичного змащення величина в'язкості базового мастила).

Розрахунки моменту тертя ковзання проводиться по формулі:

$$M_{sl} = G_{sl} + M \cdot \mu_{sl}, \quad (3.5)$$

де  $M_{sl}$  – момент тертя ковзання;

$G_{sl}$  – змінна, що залежить від:

- типу підшипника
- середнього діаметра підшипника  $d_m = 0,5 (d + D)$ ;
- радіального навантаження  $F_r$ ;
- радіального навантаження  $F_a$ ;

$\mu_{sl}$  – коефіцієнт тертя ковзання, в умовах утворення повноцінної мастильної плівки, тобто  $k \geq 2$ , може бути встановлена:

- 0,05 – для змащування мінеральними мастилами;
- 0,04 – для змащування синтетичними мастилами;
- 0,1 – для змащування трансмісійними рідинами.

Для циліндричних або конічних роликотідшипників замість вищевказаних слід використовувати наступні величини:

- 0,02 – для циліндричних роликотідшипників;
- 0,002 – для конічних роликотідшипників.

Якщо підшипники постачені контактними ущільненнями, втрати на тертя ущільнень можуть перевищувати втрати на тертя в підшипнику. Момент тертя ущільнень підшипників з ущільненнями на обох сторонах можна приблизно розрахувати за допомогою наступною емпіричного рівняння:

$$M_{\text{seal}} = K_{s1} \cdot d_s^\beta + K_{s2}, \quad (3.6)$$

де  $M_{\text{seal}}$  – момент тертя ущільнень;

$K_{s1}$  – константа, що залежить від типу підшипника;

$K_{s2}$  – константа, що залежить від типу підшипника й ущільнення;

$d_s$  – діаметр сполученої поверхні ущільнення;

$\beta$  – показник, що залежить від типу підшипника й ущільнення;

Щоб більш уважно розглянути поведінку підшипника в реальних умовах і в тих випадках, коли потрібна підвищена точність розрахунків, нова модель SKF дозволяє вводити в рівняння додаткові величини, відповідні до додаткових факторів, що впливають на моменти тертя. Ці додаткові фактори включають:

- зменшення в'язкості за рахунок нагрівання мастильного матеріалу;
- ефект кінематичного мастильного голодування в умовах крапкового змазування (у т.ч. маслоповітряного), змазування упорскуванням мастила, змащування пластичним змащенням і зниженого рівня мастила в масляній ванні;
- опір руху при змащуванні масляною ванною;
- режим змішаного тертя для малих швидкостей і/або в'язкостей і мастильних матеріалів.

З урахуванням цих додаткових джерел кінцеве рівняння загального моменту тертя підшипника має такий вигляд:

$$M = \varphi_{ish} \cdot \varphi_{rs} \cdot M_r + M_{sl} + M_{seal} + M_d, \quad (3.7)$$

де  $M$  – загальний момент тертя;

$M_r$  – момент тертя катання;

$M_{sl}$  – момент тертя ковзання;

$M_{seal}$  – момент тертя ущільнень;

$M_d$  – момент тертя за рахунок опору змащення, збовтування, розбризкування та ін.;

$\varphi_{ish}$  - коефіцієнт зменшення за рахунок нагрівання мастильного матеріалу;

$\varphi_{rs}$  - коефіцієнт зменшення в режимі кінематичного мастильного голодування.

Коефіцієнти  $\varphi_{ish}$  й  $\varphi_{rs}$  вводяться в нову модель тертя SKF для обліку ефекту зменшення в'язкості за рахунок нагрівання при зрушенні в зоні входу й мастильного голодування при високих швидкостях відповідно. Величина коефіцієнта тертя ковзання щі зростає для малих швидкостей ковзання й/або малої в'язкості в режимі змішаного тертя.

При достатньому забезпеченні підшипника мастильним матеріалом не вся його кількість може пройти через контакти; лише мізерно мала кількість використовується для формування мастильної плівки. Через це деяка кількість мастила що перебуває поблизу входу у контакт, відкидається й утворює зворотний потік (рисунок 3.2). Цей зворотний потік здійснює зрушення мастильного матеріалу з утвором тепла, що знижує в'язкість мастила й зменшує товщину мастильної плівки й величину компоненти тертя катання.

Для врахування вищевказаного ефекту коефіцієнт зменшення в'язкості за рахунок нагрівання можна приблизно розрахувати по формулі:

$$\varphi_{\text{ish}} = \frac{1}{1 + 1,84 \cdot 10^{-9} \cdot (n \cdot d_m)^{1,28} \cdot v^{0,64}}, \quad (3.8)$$

де  $\varphi_{\text{ish}}$  – коефіцієнт зменшення за рахунок нагрівання мастильного матеріалу;

$n$  – частота обертання;

$d_m$  – середній діаметр підшипника;

$v$  – кінематична в'язкість мастильного матеріалу при робочій температурі, (для змащування пластичним змащенням величина в'язкості базового мастила).

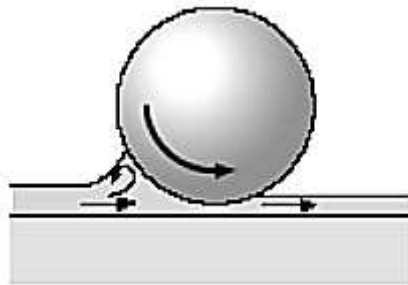


Рисунок 3.2 – Демонстрація утворення зворотного потоку мастильного матеріалу в місці контакту кочення

Величини коефіцієнта зменшення в'язкості за рахунок нагрівання при зрушенні в зоні входу  $f_{\text{ish}}$  можуть бути отримані з рисунка 3.3 як залежність комбінованого параметра  $(n \cdot d_m)^{1,28} \cdot v^{0,64}$ .

В умовах точкового змащування (у т.ч. маслоповітряного), змащування упорскуванням мастила й зниженого рівня мастила в масляній ванні (рівень мастила нижче центру самого нижнього тіла кочення), а також змащування пластичним змащенням у результаті процесу кочення надлишки мастильного матеріалу виштовхуються із зони контакту. При цьому внаслідок високої швидкості або високої в'язкості мастильного матеріалу заповнення змащення на периферії контакту кочення не відбувається. Цей ефект називається

кінематичним мастильним «голодуванням» і викликає зменшення товщини мастильної плівки й моменту тертя кочення.

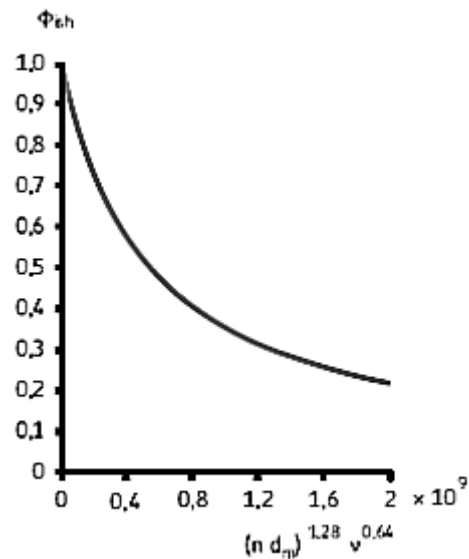


Рисунок 3.3 – Залежність коефіцієнта зменшення в'язкості за рахунок нагрівання мастильного матеріалу

Для вищевказаних умов змащування коефіцієнт зменшення можна приблизно визначити по формулі:

$$\varphi_{rs} = \frac{1}{e^{K_{rs} \cdot n \cdot \nu \cdot (d+D)} \cdot \sqrt{\frac{K_z}{2 \cdot (D-d)}}}, \quad (3.9)$$

де  $\varphi_{rs}$  – коефіцієнт зменшення в режимі кінематичного мастильного голодування;

$e$  – основа натурального логарифма,  $e \approx 2,718$ ;

$K_{rs}$  – константа мастильного голодування:  $3 \times 10^{-8}$  для зниженого рівня мастила масляної ванни й упорскування мастила,  $6 \times 10^{-8}$  для пластичного змащення й точкового змащування;

$K_z$  – константа, що залежить від типу підшипника;

$\nu$  – кінематична в'язкість мастильного матеріалу при робочій температурі;

$n$  – частота обертання;

$d$  – діаметр отвору підшипника;

$D$  – зовнішній діаметр підшипника.

В зв'язку з тим, що втрати на опір і перемішування (так званий «барботаж») мастильного матеріалу є найважливішими додатковими джерелами тертя, усі вони виражаються одним компонентом втрат  $M_d$ .

В умовах змащування масляною ванною підшипник перебуває в стані часткового або, в особливих випадках, повного занурення. У цих умовах поряд з розміром і геометрією масляної ванни рівень мастила може значно впливати на момент тертя підшипника. Для великої масляної ванни, незалежно від розмірів резервуарів і впливу інших механічних елементів, що працюють у безпосередній близькості від підшипника, наприклад, зовнішнього перемішування мастила зубчастими колесами або кулачками, втрати на опір руху в підшипнику можуть бути приблизно оцінені змінною  $V_m$ , відображеної на рисунку 3.4 залежно від співвідношення між рівнем мастила  $H$  (рисунок 3.5) і середнім діаметром підшипника  $d_m = 0,5 (d + D)$ .

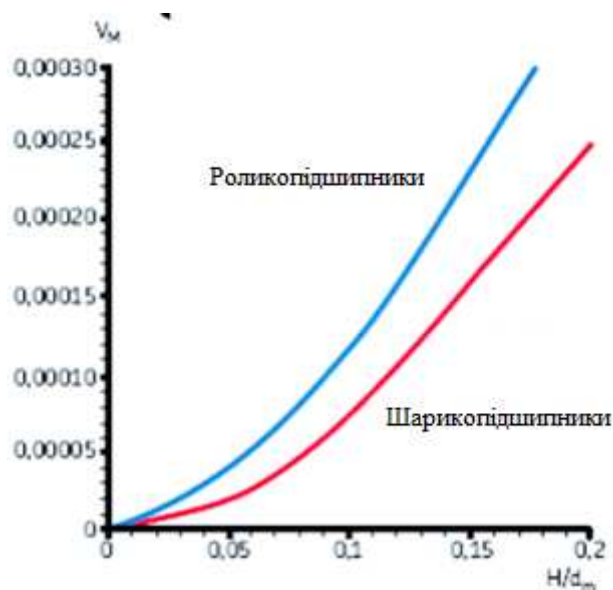


Рисунок 3.4 – Діаграма залежності змінної  $V_m$  залежно від співвідношення між рівнем мастила  $H$  і середнім діаметром підшипника  $d_m$

Рисунок 3.4 може застосовуватися для частот обертання підшипника, що не перевищують номінальну. При більш високих частотах обертання й рівнях мастила результати можуть бути зовсім іншими через вплив інших ефектів.

Залежність між моментом тертя за рахунок втрат на опір і змінної  $V_m$  на рисунку 3.4, для шарикопідшипників виражається у вигляді:

$$M_{\text{drag}} = V_m \cdot K_{\text{ball}} \cdot d_m^5 \cdot n^2, \quad (3.10)$$

для роликотпідшипників:

$$M_{\text{drag}} = 10 \cdot V_m \cdot K_{\text{roll}} \cdot B \cdot d_m^4 \cdot n^2, \quad (3.11)$$

де  $M_{\text{drag}}$  – момент тертя за рахунок втрат на опір;

$V_m$  – змінна як функція рівня мастила по рисунку 3.4;

$K_{\text{ball}}$  – константа для шарикотпідшипників;

$K_{\text{roll}}$  – константа для роликотпідшипників;

$d_m$  – середній діаметр підшипника;

$B$  – ширина внутрішнього кільця підшипника;

$n$  – частота обертання.

Величини змінної  $V_m$  можна визначити по рисунку 3.4, де червона крива відповідає шарикотпідшипникам, а синя – роликотпідшипникам.

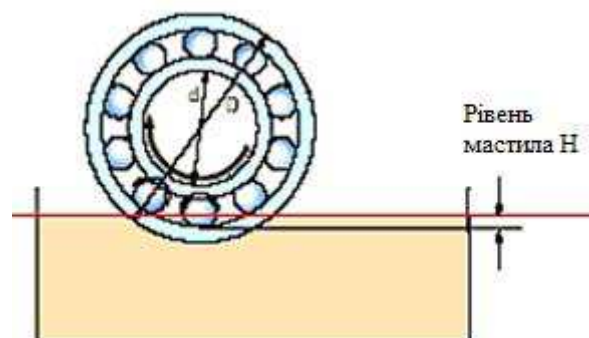


Рисунок 3.5 – Схема до визначення рівня мастила в масляній ванні

В умовах, що характеризуються малими величинами  $k \geq 2$ , підшипник перебуває в режимі змішаного тертя, де іноді може мати місце контакт «метал–метал», що приводить до збільшення тертя. На рисунку 3.6 представлена типова залежність моменту тертя підшипника від частоти обертання й в'язкості мастильного матеріалу. У період запуску з ростом швидкості або в'язкості величина моменту тертя зменшується, тому що з'являється мастильна плівка, що розділяє тіла й доріжки кочення й підшипник переходить до еластогідродинамічного режиму змащування. З подальшим зростанням швидкості або в'язкості тертя збільшується за рахунок збільшення товщини мастильної плівки до настання ефекту мастильного голодування, викликуваного високою швидкістю й нагріванням і ведучого до зменшення тертя.

Коефіцієнт тертя ковзання можна обчислити по наступній формулі:

$$M_{SL} = \Phi_{BL} \cdot M_{BL} + (1 - M_{BL}) \cdot M_{EHL}, \quad (3.12)$$

де  $M_{SL}$  – коефіцієнт тертя ковзання;

$\Phi_{BL}$  – коефіцієнт режиму змішаного тертя;

$M_{BL}$  – коефіцієнт, що залежить від змісту добавок у мастильному матеріалі, зразкова величина – 0,15;

$M_{EHL}$  – коефіцієнт тертя в умовах утвору мастильної плівки:

0,05 – для змащування мінеральними мастилами;

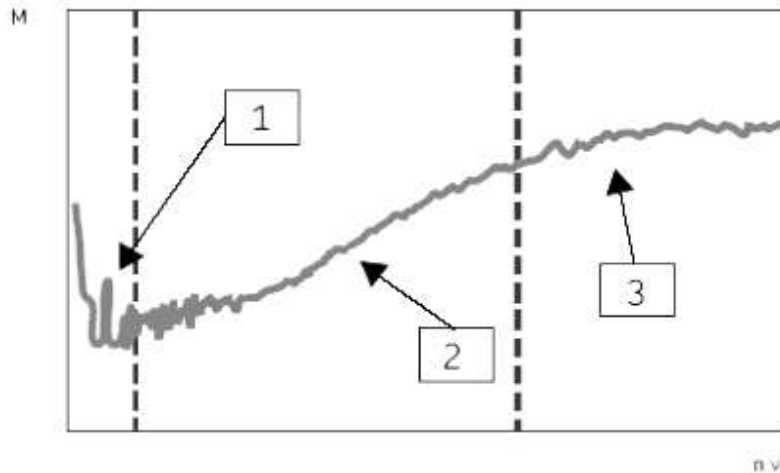
0,04 – для змащування синтетичними мастилами;

0,1 – для змащування трансмісійними рідинами.

Зміна величини зазору/перекошу підшипників приводить до зміни моменту тертя. Вищеописана модель слухна для умов нормального зазору й відсутності перекошу в підшипнику. Однак в умовах високих робочих температур підшипника або високих швидкостей внутрішній зазор підшипника може зменшуватися, а тертя відповідно зростати. При наявності перекошу тертя, як правило, зростає, однак, у випадку самоустановлювальних шарикопідшипників, сферичних роликпідшипників, тороїдальних роликпідшипників CARB і



сферичних упорних роликотідшипників рiст тертя залежно вiд величини перекоосу мiзерно малий.



зона 1 – режим змішаного тертя; зона 2 – режим еластогiдродинамiчного змашування (EHL); зона 3 – режим EHL + ефект мастильного голодування

Рисунок 3.6 – Залежність моменту тертя підшипника від швидкості й в'язкості

При використанні пластичного змащення й заповненні (або повторному змашуванні) підшипника рекомендованою кількістю змащення протягом перших годин або днів роботи (залежно від швидкості) тертя в підшипнику може значно перевищувати величини, що передбачалися раніше. Це пояснюється тим, що пластичному змащенню потрібен час щоб перерозподілитися у вільному просторі підшипника.

Для зразкової оцінки цього ефекту потрібно помножити розрахункову величину початкового моменту тертя ковзання на два для підшипників легких серій і на чотири для підшипників важких серій. Після цього періоду «приробляння» тертя в підшипнику падає до рівня тертя підшипників, що змашуються мастилом, а в деяких випадках навіть нижче. Перевищення рекомендованих обсягів заповнення пластичним змащенням приводить до підвищеного тертя в підшипнику.

Пусковий крутний момент підшипника кочення визначається як момент тертя, який необхідно подолати для того, щоб підшипник, що перебуває в нерухливому стані, почав обертатися. При нормальній температурі навколишнього середовища від +20 до +30 °С, при запуску при нульовій швидкості й  $\mu_{sl} = \varphi_{bl}$  пусковий крутний момент можна розрахувати як суму тільки моменту тертя ковзання й моменту тертя ущільнень, якщо такі є.

Таким чином:

$$M_{\text{start}} = M_{\text{sl}} + M_{\text{seal}}, \quad (3.13)$$

де  $M_{\text{start}}$  – пусковий момент тертя;

$M_{\text{sl}}$  – момент тертя ковзання;

$M_{\text{seal}}$  – момент тертя ущільнень.

Однак, пусковий момент тертя для конічних роликотідшипників з більшим кутом контакту може бути майже в чотири рази вище розрахункового й майже у вісім раз більше для упорних сферичних роликотідшипників.

### 3.3 Експериментальні методи визначення моменту опору підшипників кочення

#### 3.3.1 Мета та матеріально–технічне забезпечення проведення експерименту

Мета проведення експерименту – визначення моменту опору обертанню залежно від двох факторів: частоти обертання підшипника й кута нахилу. У технічній літературі звичайно не визначають взаємний вплив частоти обертання підшипника й кута нахилу на величину моменту опору обертанню, тобто не враховують взаємодію цих факторів.

Ставилося завдання дослідити вплив 2-х вищевикладених факторів на момент опору. Одночасно визначалася відносна значимість факторів і їх

взаємодій. Оцінювався ступінь мінливості моменту опору обертанню підшипника від контрольованих факторів і від випадкових поміток, викликаних похибками вимірів, коливаннями частоти, навантаження й ін.

Для застосування на практиці результатів дослідження необхідно було підтвердити обґрунтування заміни підшипників ковзання на підшипники кочення, які мають кращі технологічні характеристики в порівнянні з попередніми.

Прибор типу ДП11А призначений для проведення лабораторних і дослідницьких робіт з метою визначення момента тертя в підшипниках кочення.

Робота приладу заснована на виникненні моменту сил тертя, що з'являються в підшипнику кочення при обертанні вала.

Момент сил тертя, впливаючи на плоску вимірювальну пружину, створює певний прогин на її кінці. Величина прогину пропорційна величині моменту, що змінює величину світлового потоку на фотодіод, величина фотоструму, який реєструється мікроамперметром і характеризує величину моменту сил тертя.

На приладі можна визначати залежності моменту тертя в підшипниках від швидкості обертання вала, величини й напрямку навантаження, що діє на підшипник. яке створюється змінними вантажами й залежить від нахилу осі обертання. а також від розмірів випробуваних підшипників.

Основні вузли приладу (рисунок 3.7) установлені на вертикальній платі 4, яка змонтована на литій стійці 2, що закріплена на основі приладу 1. Органи керування й мікроамперметр розташовані на передній панелі 12.

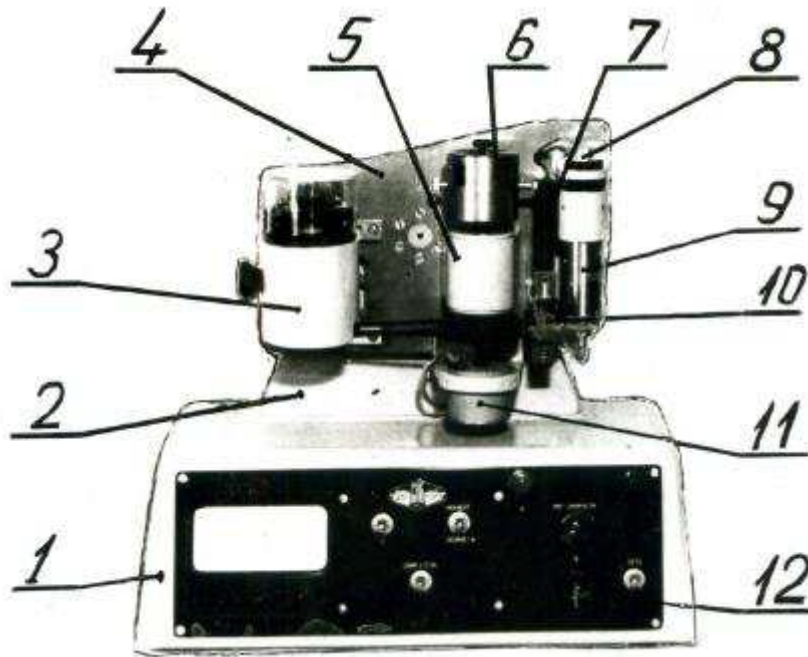
Електродвигун змонтований у спеціальному корпусі 3 обладнаному амортизаторами для зменшення вібрації.

Обертання на робочий валик передається за допомогою пасової передачі. Регулювання натягу передачі здійснюється переміщенням корпуса в горизонтальній площині.

Робочий валик приладу змонтований на двох шарикопідшипниках у шпинделі 5. Верхня частина валика має різьбовий отвір, у який угвинчується вузол випробуваного підшипника 6.

У комплект приладу входять шість змінних вузлів з різними підшипниками. внутрішній діаметр яких 5; 7; 8; 10; 12; 14 мм.

При роботі на вузли встановлюють і закріплюють гвинтами вантажі, що створюють навантаження 0,5; 1 і 2 кг. На вантажах є повідці, які входять у сідловину плоскої вимірювальної пружини 7.



1 – основа приладу; 2 – лита стійка; 3 – корпус для електродвигуна; 4 – вертикальна плата; 5 – шпindel; 6 – досліджений підшипник; 7 – плоска вимірювальна пружина; 8 – фотодіод; 9 – освітлювач; 10 – хомут із затискною рукояткою; 11 – тахогенератор; 12 – панель керування

Рисунок 3.7 – Устрій приладу ДП11А

Тахогенератор 11 пов'язаний з робочим валіком і служить для визначення його швидкості обертання. Струм у ланцюзі тахогенератора вимірюється мікроамперметром.

Вимір моменту роблять вимірювальним пристроєм, змонтованим на основі, яка кріпиться до плити гвинтом. Величина світлового потоку, створюваного освітлювачем 9 вимірюється фотодіодом 8 і залежить від положення шторки, укріпленої на кінці пружини, що деформується. Для

регулювання жорсткості вимірювальної пружини передбачено хомут 10 із затискною рукояткою.

Конструкція приладу забезпечує поворот плити із установленими на ній механізмами на кут  $90^\circ$  у вертикальній площині (рисунок 3.8). чим досягається зміна співвідношення радіального й аксіального навантаження. Поворот плити здійснюється рукояткою із пружинним фіксатором. Із протилежної сторони стійки змонтований сектор з пазами, що дозволяють фіксувати положення плити через кожні  $15^\circ$ .

Електрична схема приладу наведена на рисунку 3.8.

Регулювання числа обертів двигуна здійснюється потенціометром R4. Бареттер Л1 призначений для стабілізації струму через освітлювальну лампу Л2. Потенціометри R1, R2 і R5 призначені для регулювання показань вимірювального приладу – мікроамперметра ИП у процесі регулювання приладу. На лицьовій панелі приладу розміщені мікроамперметр ИП, ручка потенціометра R4 для безступінчастого числа обертів, запобіжник Пр. сигнальна лампочка Л3 і чотири тумблери керування приладом.

Тумблер В1 – «Мережа» – призначений для включення приладу в мережу постійного струму 110 В.

Тумблер В2 — «1–2» – призначений для виміру чутливості вимірювального приладу – мікроамперметра.

Тумблер В3 – «Двигун» – призначений для включення електродвигуна М2 приладу.

Тумблер В4 – «Швидкість–Момент» – призначений для перемикання мікроамперметра з виміру струму тахогенератора М1 (вимір швидкості обертання робочого валика) на вимір фотоструму від фотодіода Д2.

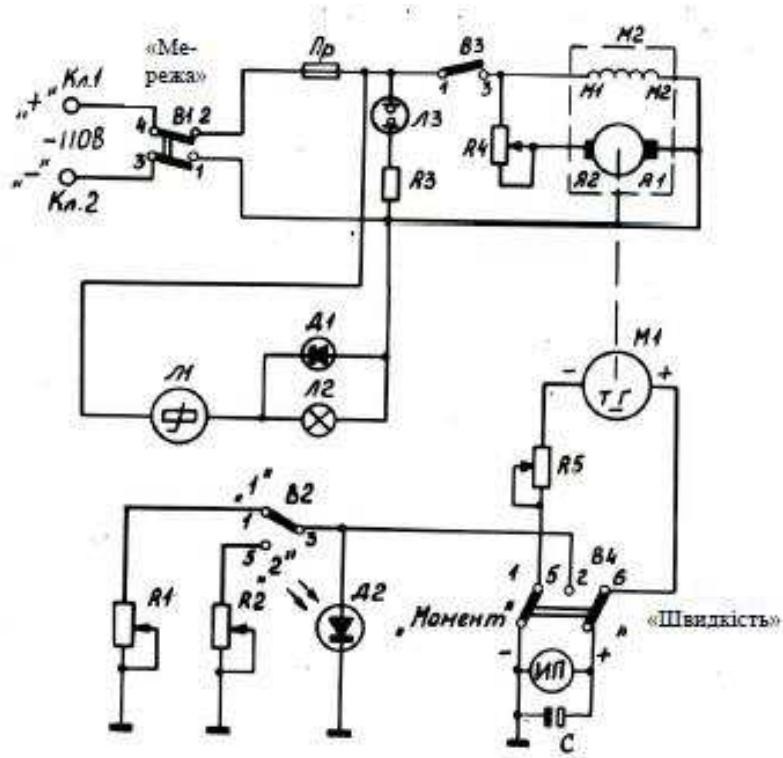


Рисунок 3.8 – Електрична схема приладу ДП11А

Загльний вигляд приладу ДП11А при підготовці до проведення експерименту представлено на рисунках 3.9–3.12, а технічна характеристика в таблиці 3.1.



Рисунок 3.9 – Підготовка експериментальної установки ДП11А до проведення експерименту





Рисунок 3.10 – Експериментальна установка ДП11А(вид зверху)



Рисунок 3.11 – Тарировочний пристрій установки ДП11А



Рисунок 3.12 – Панель керування установкою ДП11А

Таблиця 3.1 – Технічна характеристика приладу ДП11А

№	Найменування	Величина
1	Габарні розміри прибору, мм	300x445x430
2	Вага прибору, кг	32
3	Вага змінних вантажів, кг	0,5 1,0
4	Передатне відношення пасової передачі	1,5
5	Спосіб вимірювання моменту	За допомогою фотодіода та мікроамперметра
6	Спосіб вимірювання числа обертів вихідного валу шпинделя	За допомогою тахогенератора
7	Електродвигун СЛ-261 – потужність. Вт – частота обертання. $\text{хв}^{-1}$ – род току – номінальний момент на валу	20 3600–4600 постійний 0,066 Нм



### 3.3.2 Етапи проведення експерименту

Порядок дій при проведенні дослідження моменту тертя на приборі ДП11А.

1. Підготувати дослідні зразки підшипників та прибор до експерименту.
2. З'єднати з підсилювачем вимірювальні мости із дрововими датчиками, що служать для визначення крутних моментів, перевірити й підключити їх вимірювальні мости до обчислювально–вимірювального комплексу МС–212.
3. Налаштувати обчислювально–вимірювальний комплекс МС–212 та програму Recorder на одночасний запис по двом каналам.
4. Вибрати відповідно до навантажень необхідні ступені посилення тензометричного підсилювача, збалансувати вимірювальні мости й налаштувати обчислювально–вимірювальний комплекс МС–212 та програму Recorder на одночасний запис по двом каналам частот обертання підшипника й крутних моментів.
5. Зробити зовнішній огляд установки, переконавшись в її справності, подати напругу на пульт керування (загорілася сигнальна лампочка – пульт включений). Провести тарування прибору та прокодувати обчислювально–вимірювальний комплекс МС–212.
6. Включити прибор й записати діаграму навантажень при роботі прибору з дослідними зразками.
7. Відключити прибор.
8. Обробити осцилограми навантажень визначивши величини крутого моменту та приведенного коефіцієнта тертя.

### 3.3.3 Вимірювальна апаратура та програмні комплекси

Модуль МС–212 призначений для роботи із мостовими, полумостовими тензодатчиками й тензорезисторамн опором 100-1000 Ом при проведенні статичних і динамічних вимірів та знаходиться в лабораторії металургійного обладнання. Технічні характеристики модуля наведено в табл. 3.2

Основні області застосування:

- вимір механічних навантажень;
- вимір зусиль (тяга, вага);
- високоточний вимір лінійних переміщень;
- вимір тисків.

Керування модулями, вимір і реєстрація сигналів здійснюється засобами програми Recorder. Для відображення, обробки, детального аналізу зареєстрованих сигналів і виводу на друк результатів служить програма WinПОС.

Таблиця 3.2 – Технічні характеристики модуля МС–212

Параметр	Значення
Кількість незалежних канатів	4
Діапазони виміру. мВ/В	0..Д5; ±0,5; 0...2; ±2; 0...4; ±4; 0...S; ±8; 0...16; ±16
Частота дискретизації. Гц: "динамічний" "статичний"	150...7 680 50... 1 024
Напруга живлення тензодатчиків (знакозмінний струм). В	2,5; 5
Залишковий зсув нуля (після внутрішнього калібрування), мкВ	2
Температурний дрейф зсуву нуля. мкВ/°С	0,5
Часовий дрейф зсуву нуля. мкВ/1000 год	2,5
Основна наведена (до діапазону виміру) погрішність. %	±0.05
Додаткова погрішність у робочих умовах експлуатації, %	0.05
Часовий дрейф коефіцієнта передачі. ppm/1000 год	10
Інтегральна нелінійність. ррш від повної шкали	15
Смуга пропускання при нерівномірності 0,1 дБ Гц	0...1 000
Придушення синфазної складової вхідного сигналу, дБ	100
Міжканальне проходження диференціальної складової. дБ	-100
Нерівномірність АЧХ у смузі 0...1 ... 1 000 Гц, дБ	0.1
Доповнення до напівмосту з ряду (опціонально). Ом	120; 200; 350; 700

## Особливості

1. Модуль здійснює живлення датчика.
2. Оснащений функціями балансування, сигналізації про перевантаження й перевірки вхідних ланцюгів кожного каналу на обрив і коротке замикання.
3. Можливість калібрування внутрішнім шунтом.

Убудовані антиаліасні фільтри. Смуга пропускання фільтра автоматично настроюється на половину заданої частоти дискретизації.

### 4. Два режими роботи:

–динамічний. Чотирьохканальний режим, призначений для проведення вимірів з максимальною частотою збору даних, що не мають високих вимог по напрузі зсуву нуля.

–статичний. Чотирьохканальний режим, призначений для проведення статичних вимірів з максимальною точністю.

Recorder – інструмент для створення стендових вимірювальних систем.

Зручне, надійне, універсальне програмне забезпечення для керування роботою вимірювально–обчислювальних комплексів МС на базі різних стандартів (PXI, RXI, MC).

Recorder дозволяє:

- управляти вимірювальними каналами, робити їхнє налаштування, діагностику:

- управляти процесами одержання вимірювальних даних і збереження їх у файли:

- використовувати базу даних градуйованих характеристик, виконувати процедури градування, калібрування, перевірки:

- відображати на екрані вимірювані параметри у вигляді таблиць і осцилограм:

- підключати додаткові бібліотеки (програмні модулі) для розширення функціональності.

Recorder – відкрите для користувача програмне забезпечення, що дозволяє підключати додаткові програмні модулі, розширюючи функціональні

можливості вимірювальної системи.

Склад стандартної поставки пакета набору додаткових модулів дозволяє:

- здійснювати в режимі реального часу компенсацію температури холодного спаю при проведенні вимірів температури за допомогою термопар;
- робити розкладання сигналу в реальному часі в частотний спектр (використовується алгоритм швидкого перетворення Фур'є (БПФ));
- здійснювати запуск реєстрації по тимчасових параметрах.

Функції

- автоматичне визначення конфігурації вимірювального комплексу (ідентифікація встановлених вимірювальних модулів);
- діагностика роботи вимірювальних модулів;
- градуювання, калібрування вимірювальних каналів як комплексу МІС, так і всього вимірювального ланцюжка «датчик – нормалізатор сигналу – вимірювальний модуль»;
- проведення процедури перевірки вимірювальних каналів приладу;
- завдання (настроювання) режимів роботи вимірювального устаткування (діапазон виміру, частота дискретизації й т.д.);
- печатка звіту про настроювання;
- перегляд вимірюваного сигналу в реальному масштабі часу в графічному (графік, осцилограма, гістограма) і цифровому (табличному<sup>7</sup>) поданнях;
- реєстрація вимірювальної інформації;
- статистична обробка результатів вимірів;
- відтворення в режимі симуляції зареєстрованої раніше інформації;
- створення й керування розрахунковими параметрами;
- аварійний контроль параметрів;
- виконання функцій високорівневого інтелектуального драйвера для бСАОА систем (ОРС сервер);
- створення мнемосхем;

- одержання даних з інших систем (OPC клієнт – можливість інформаційного обміну між LabVIEW і вимірювально–обчислювальними комплексами МІС).

#### Відображення даних

- можливість створення декількох сторінок формулярів;
- підтримка мнемосхем;
- стандартне відображення даних у вигляді осцилограм, таблиць, трендів.

#### База даних градуювальних характеристик

- керування набором градуювальних характеристик;
- організація у вигляді каталожної структури;
- імпорт/експорт у різних форматах;
- легкий перенос між приладами: графічний перегляд виду градуювальних характеристик;
- підтримка різних типів функцій характеристик.

#### Розрахункові параметри

- створення користувальницьких параметрів з використанням базових арифметичних операцій;
- не вимагає кваліфікації програміста;
- можливість організації складних багаторівневих умов;
- керування вихідними апаратними каналами за допомогою простих математичних виражень.

#### Звіт про програму виміру

- формування підготовленого для друку звіту про поточні налаштування системи;
- можливість включення всієї інформації про канали, градуювальних характеристиках і додатковій інформації від користувальницьких модулів;
- повний і скорочений формат.

WinПОС – пакет післяекспериментальної обробки вимірювальної інформації.

WinПОС – професійний інструмент для дослідження динамічних і повільно змінних процесів, графічного подання даних і оформлення звітів.

WinПОС надає користувачеві інтерфейси, за допомогою яких можна створювати свої сценарії, що підключаються модулі або додатки, що працюють із даними й алгоритмами WinПОС. практично в будь-якому сучасному середовищі програмування.

WinПОС Expert дозволяє зробити аналіз нестационарних, динамічних процесів, у тому числі й вібраційних.

Особливості:

- більше 50 алгоритмів обробки сигналів;
- потужні засоби побудови й оформлення графіків для документування (двомірні, тривимірні, параметричні, графіки в полярних координатах);
- функції експрес-звіту;
- пакетна обробка даних;
- обробка даних WAV і UFF форматів;
- редагування сигналів;
- можливість створення плагинів імпорту-експорту даних;
- табличний перегляд значень сигналів;
- необмежена довжина сигналів;
- інтеграція з MATLAB™;
- може використовуватися як розподілена «клієнт-сервер» система післяекспериментальної обробки даних;
- підтримка OS Windows XP/Vista/7;
- розгорнута довідкова система.

Керування даними

- Стан WinПОС можна зберігати й відновлювати. Передбачено автоматичне збереження при виході й відновлення останнього сеансу при завантаженні.

- Сигнали з різних джерел можна переглядати в загальній тимчасовій шкалі завдяки обробці інформації системи єдиного часу.

- Інтеграція з базою даних випробувань: завантаження реєстрацій, вибірок, створення записів.

Засоби оформлення графіків для підвищення наочності подання даних і підготовки звітів

- номера ліній;
- печатка значень на лініях сітки;
- легенда;
- підпису, винесення, коментарі;
- копіювання графіків через буфер обміну, наприклад у текст документів;

- емуляція рулонного друку;
- відображення режимів, міток, уставок, пауз, пропусків даних;
- різні значки для виділення значень ліній;
- автоматичний пошук екстремумів сигналів;
- автоматичне розміщення винесень.

Інтеграція з Microsoft Office та можливість натисканням однієї кнопки:

- вставити поточну сторінку графіків у позицію курсору у вікні Word;
- скопіювати сигнали активного графіка в таблицю Excel і побудувати графік в Excel;
- скопіювати значення сигналів під курсором у рядок таблиці Excel.

Інтеграція з пакетом MATLAB

- виклик алгоритмів MATLAB з налаштуваннями у вікнах WinПОС «Авто спектр» і «Вейвлети»;
- простий перенос сигналів в MATLAB.

### 3.3.4 Складання плану експерименту

Планування експерименту виходить із статистичного характеру залежностей, тому отримані рівняння піддаються ретельному статистичному аналізу з метою витягнути з результатів експерименту максимум інформації і

переконалися в достовірності отриманої залежності і її точності. Кожен експеримент несе в собі якусь погрішність, для підвищення надійності результатів робляться для кожного рядка таблиці планування повторення дослідів  $m^*$  разів.

Відрядкові (вибіркові) дисперсії підраховуються по формулі:

$$S_j^2 = \frac{\sum_{i=1}^{m^*} (y_{ji} - \bar{y}_j)^2}{m^* - 1}, \quad (3.14)$$

де  $\bar{y}_j = \frac{\sum_{i=1}^{m^*} y_{ji}}{m^*}$  – середній відгук по  $m^*$  дослідах в точці з номером  $j$ .

Дисперсія відтворюваності відгуку  $S_{\text{восн}}^2$  є середньоарифметичне дисперсій усіх  $n$  різних варіантів дослідів:

$$S_{\text{восн}}^2 = \frac{\sum_{j=1}^n S_j^2}{n} = \frac{\sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^{m^*} (y_{ji} - \bar{y}_j)^2}{n(m^* - 1)}. \quad (3.15)$$

Перш ніж робити об'єднання дисперсій, слід переконалися в їх однорідності. Перевірка робиться за допомогою критерію Фишера або Кохрена. Для оцінки значущості коефіцієнтів передусім знаходять дисперсію коефіцієнтів регресії. Враховуючи властивості 1–3 плану, при однаковому дублюванні дослідів по точках з числом повторних дослідів  $m^*$  отримаємо:

$$S_b^2 = \frac{S_{\text{Восп}}^2}{m^* n},$$

а за відсутності дублювання матимемо:

$$S_b^2 = \frac{S_{\text{Восп}}^2}{n}.$$



Отже, усі коефіцієнти рівняння регресії повного факторного експерименту (ПФЕ) мають однакову точність (дисперсію). Плани, за результатами яких коефіцієнти рівняння регресії визначаються з однаковою дисперсією, називаються ротатабельними. Надалі перевірка значущості кожного коефіцієнта робиться з використанням  $t$ -критерію Стюдента. Статистично незначимі коефіцієнти виключаються з рівняння, а інші коефіцієнти при цьому не перераховуються. Після цього рівняння регресії складається у вигляді рівняння зв'язку вихідного параметра  $y$  і змінних  $X_i$  що включає тільки значимі коефіцієнти.

Після обчислення коефіцієнтів рівняння слід передусім перевірити його придатність або адекватність. Для цього досить оцінити відхилення вихідної величини  $\hat{y}$ , передбаченої рівнянням регресії, від результатів експерименту у різних точках.

Розсіяння результатів експерименту відносно рівняння регресії, що апроксимує шукану залежність, можна охарактеризувати за допомогою дисперсії адекватності, оцінка якої, справедлива при однаковому числі дублюючих дослідів, знаходиться по формулі :

$$S_{ad}^2 = \frac{m * \sum_{j=1}^n (\bar{y}_j - \hat{y}_j)^2}{n - l} \quad (3.16)$$

де  $n$  – число дослідів (варіантів);

$$l = k + 1,$$

де  $k$  – число членів в рівнянні регресії.

Перевірка адекватності полягає в з'ясуванні співвідношення між дисперсією адекватності  $S_{ad}^2$  і дисперсією відтворюваності  $S_{восн}^2$  і проводиться за допомогою  $F$ -критерію Фишера, який в даному випадку розраховується як:

$$F = \frac{S_{ад}^2}{S_{восп}^2}. \quad (3.17)$$

Якщо вчислене значення критерію менше теоретичного  $F_{\alpha; m_1; m_2}$  для відповідних ступенів свободи  $m_1 = n - 1$ ,  $m_2 = n(m^* - 1)$ , при заданому рівні значущості  $\alpha$ , то опис властивостей об'єкту рівнянням регресії визнається адекватним об'єкту. Адекватність моделі може бути досягнута зменшенням інтервалу варіювання чинників, а якщо це не дає результату, то переходом до плану другого порядку.

### 3.3.5 Обробка результатів проведення експерименту

За допомогою прибору ДП11А проводимо експеримент по з'ясуванню залежності моменту опору підшипників від кута нахилу та частоти обертання. Для дослідження використовуємо конічний радіально-опорний підшипник № 30202 KG. В результаті отримаємо наступні осцилограми моментів опору підшипника від різних навантажень.

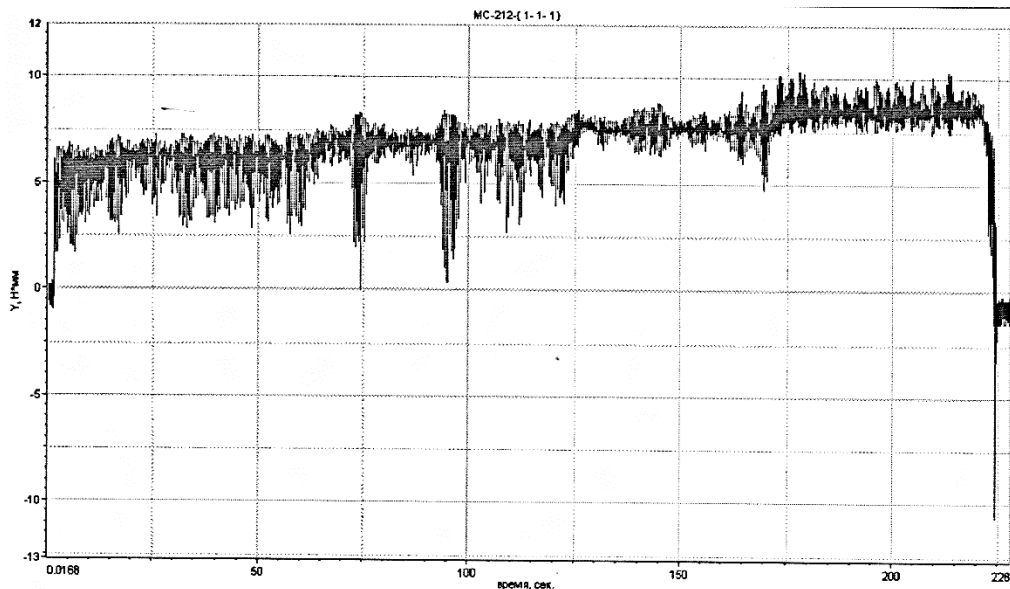


Рисунок 3.13 – Осцилограма моментів опору підшипника при радіальному навантаженні під кутом  $\alpha = 90^\circ$

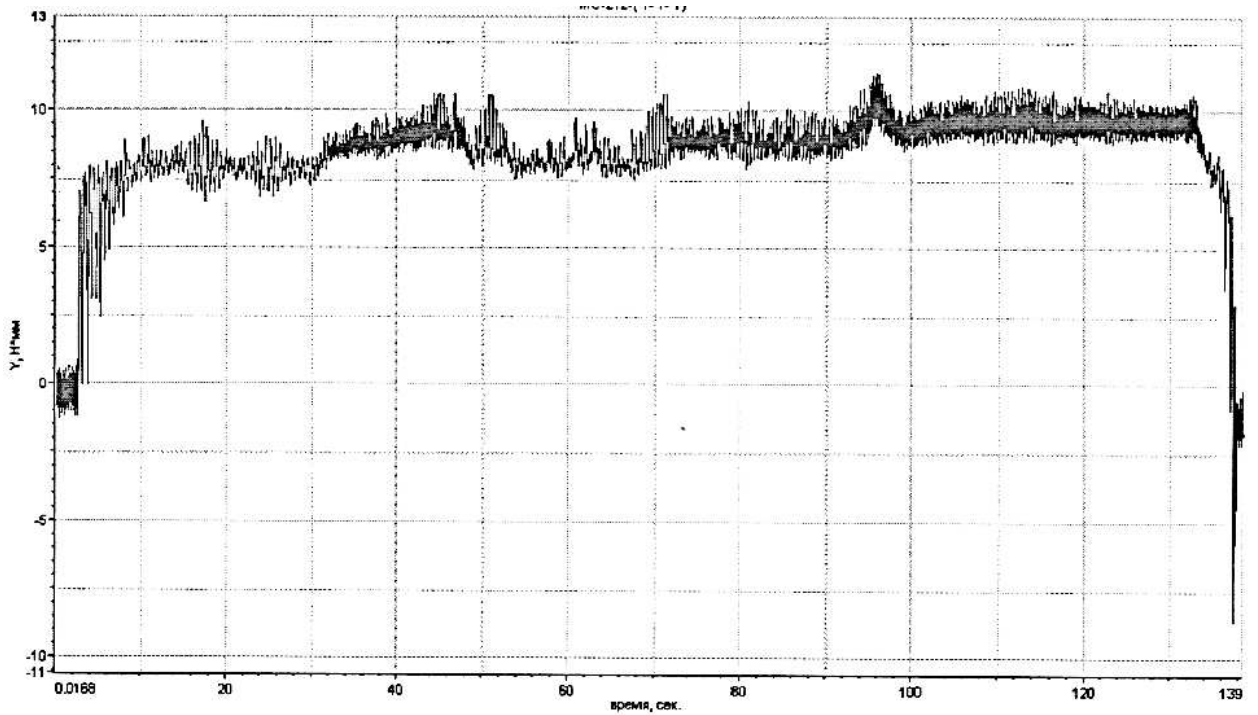


Рисунок 3.14 – Осцилограма моментів опору підшипника при осьовому навантаженні під кутом  $\alpha=0^\circ$

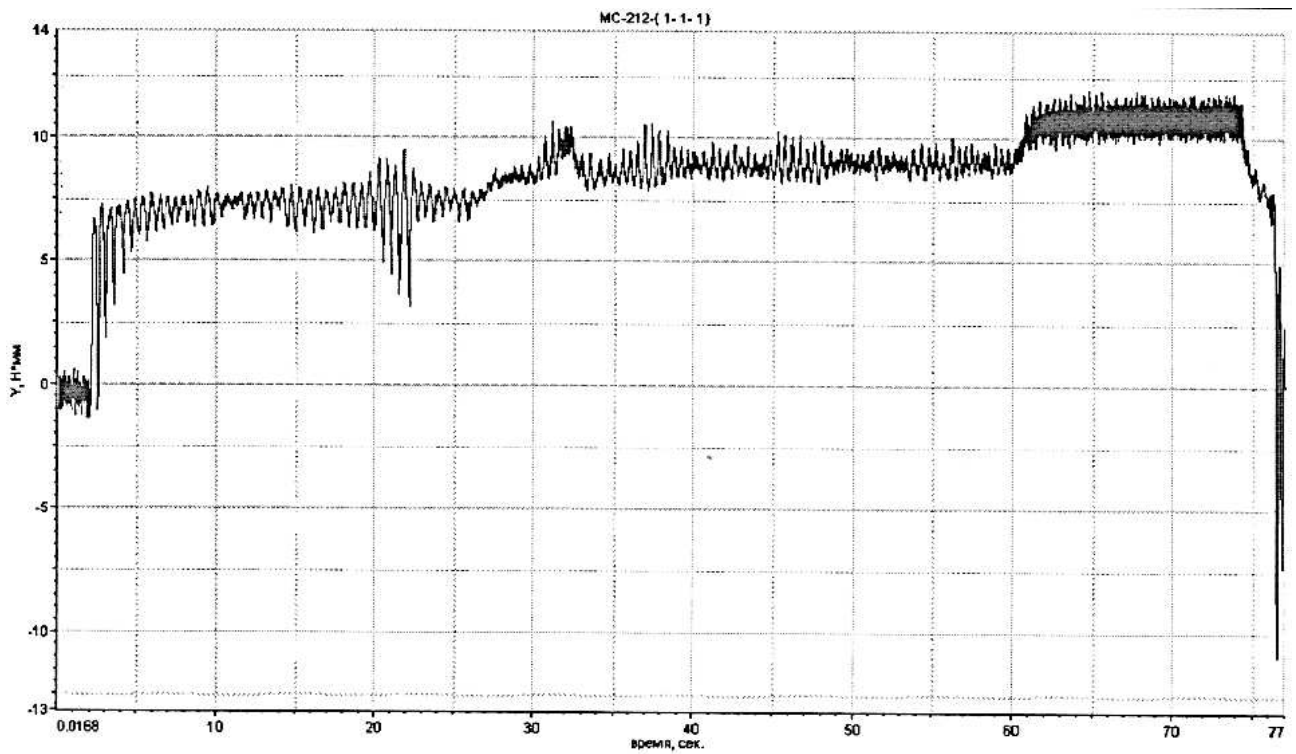


Рисунок 3.15 – Осцилограма моментів опору підшипника при осьовому навантаженні під кутом  $\alpha=0^\circ$  з інтервалом 10 секунд

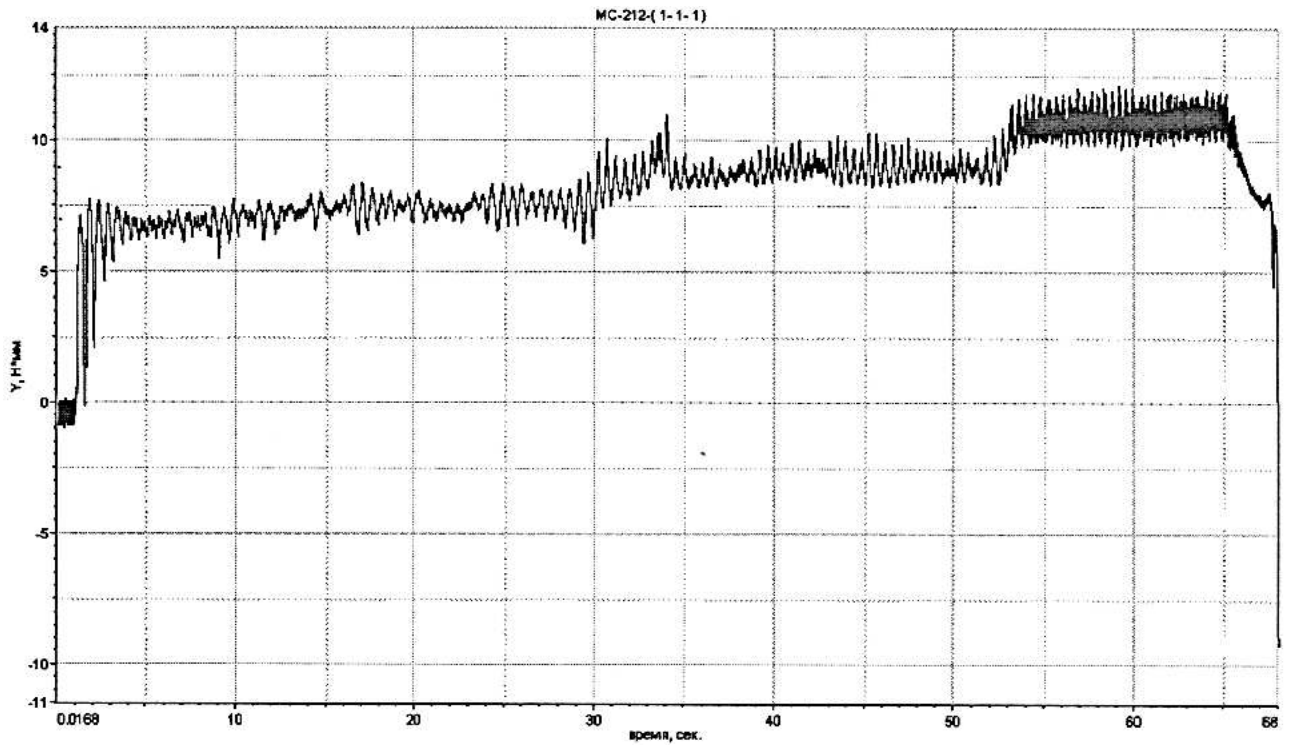


Рисунок 3.16 – Осцилограма моментів опору підшипника при осьовому та радіальному навантаженнях під кутом  $\alpha=15^\circ$

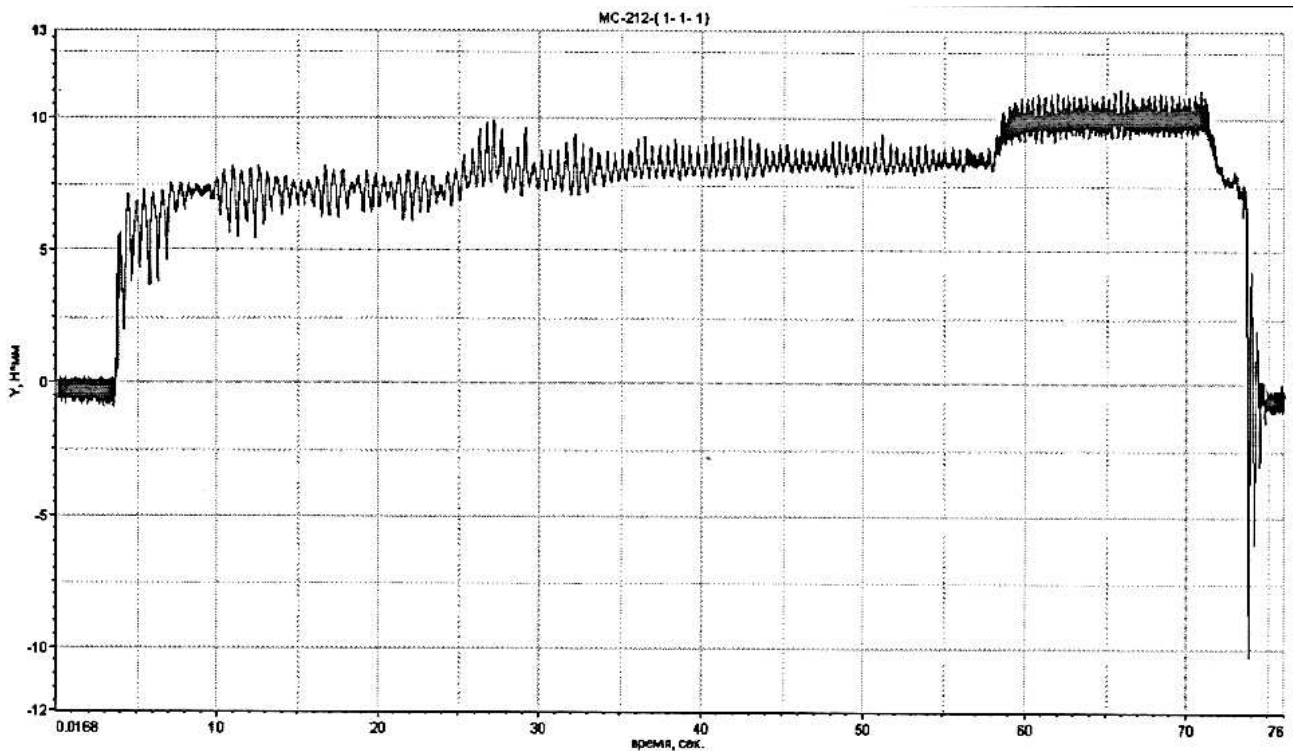


Рисунок 3.17 – Осцилограма моментів опору підшипника при осьовому та радіальному навантаженнях під кутом  $\alpha=30^\circ$

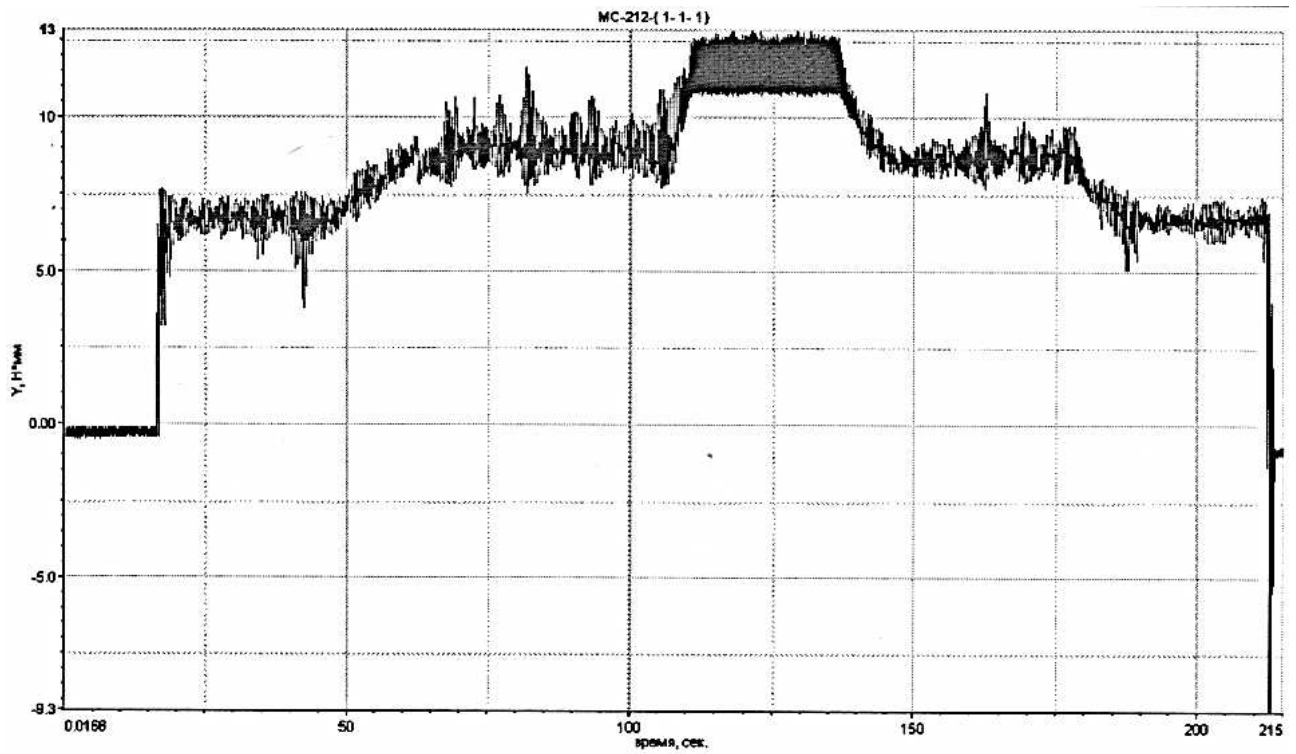


Рисунок 3.18 – Осцилограма моментів опору підшипника при осьовому та радіальному навантаженнях під кутом  $\alpha=45^\circ$

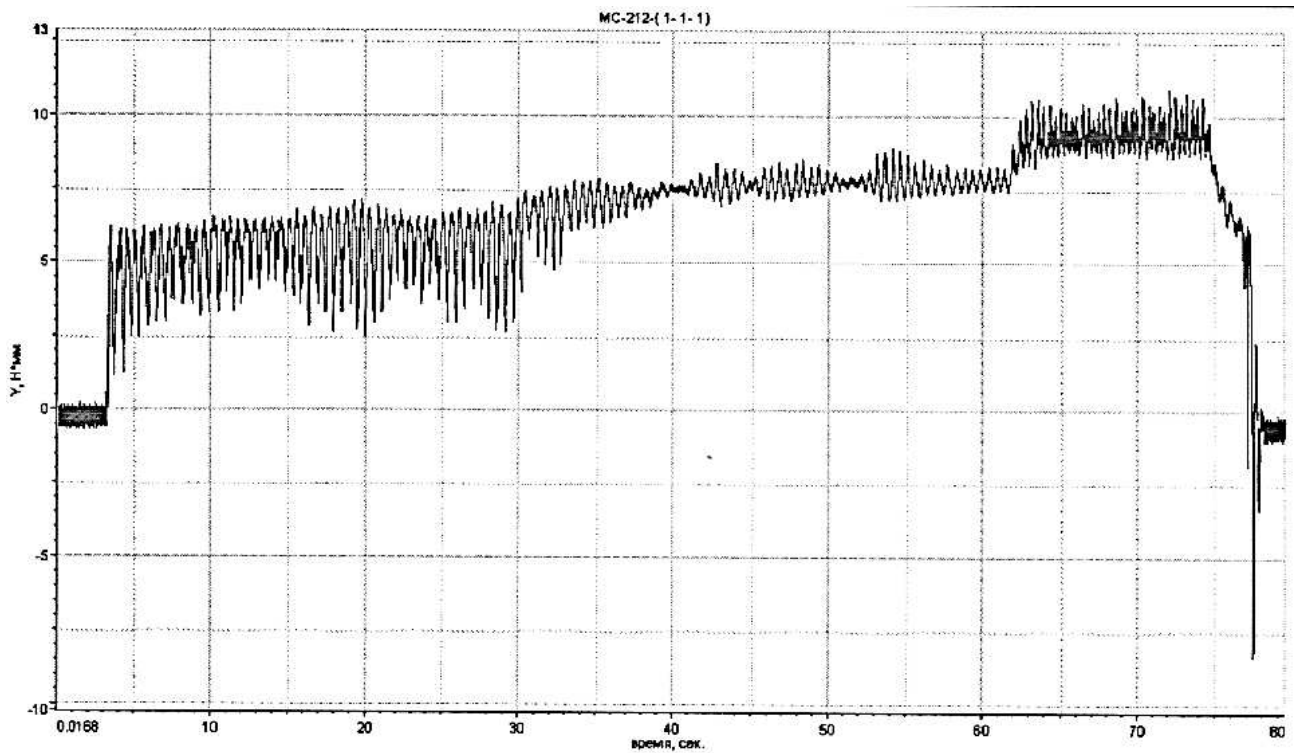


Рисунок 3.19 – Осцилограма моментів опору підшипника при осьовому та радіальному навантаженнях під кутом  $\alpha=60^\circ$

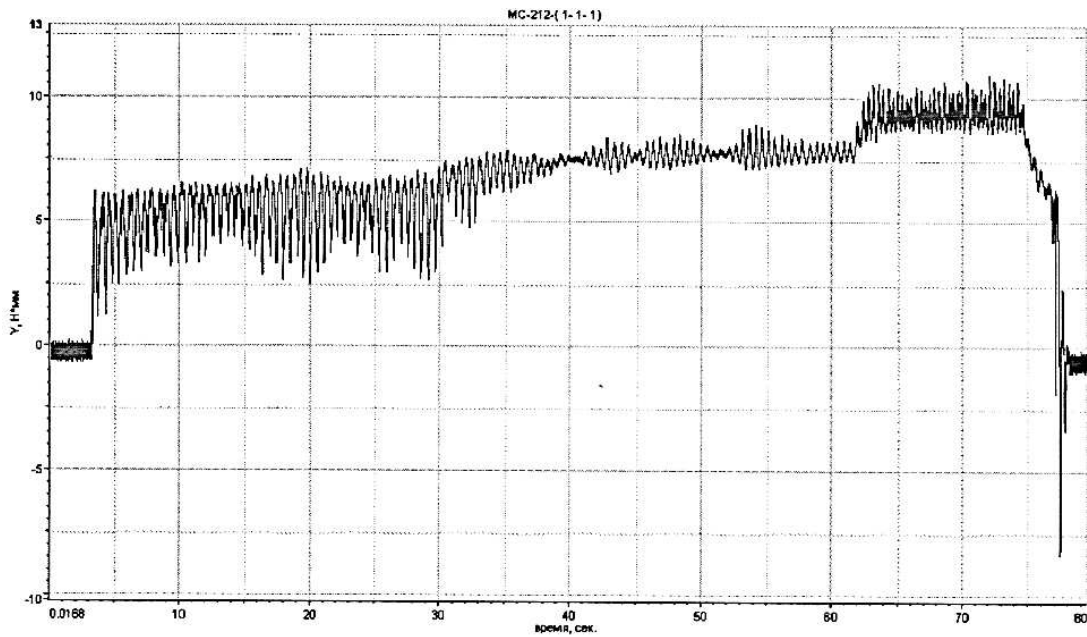


Рисунок 3.20 – Осцилограма моментів опору підшипника при осьовому та радіальному навантаженнях під кутом  $\alpha=75^\circ$

За допомогою отриманих осцилограм експериментальні значення моментів опорів в підшипнику кочення в залежності від кута нахилу та частоти обертів занесені в таблицю 3.3 та представлені у вигляді графічної залежності на рисунках 3.21, 3.22.

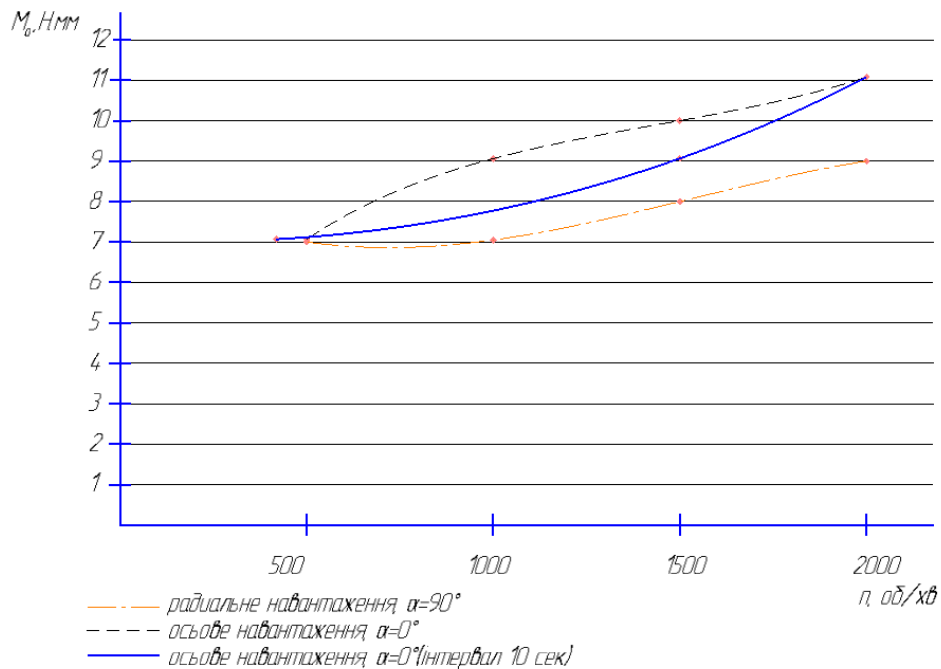


Рисунок 3.21 – Графік залежності моменту опору від частоти оборотів при окремо осьових і радіальних навантаженнях

Таблиця 3.3 – Значення моментів опорів в підшипнику кочення в залежності від кута нахилу та частоти обертів

Маса груза m, кг	Число оборотів n, об/хв	Кут нахилу $\alpha$ , град	Момент опору M, Н·мм
1	500	90	7,0
	1000		7,05
	1500		8,0
	2000		9,0
1	500	0	7,05
	1000		9,05
	1500		10,0
	2000		11,05
1	400	0	7,05
	1500		9,05
	2000		11,05
1	400	15	7,05
	1500		9,0
	2000		11,0
1	400	30	7,0
	1500		9,0
	2000		10,05
1	400	45	7,05
	1500		9,0
	2000		10,0
1	400	60	7,0
	1500		9,0
	2000		11,0
1	400	75	6,0
	1500		8,0
	2000		9,5

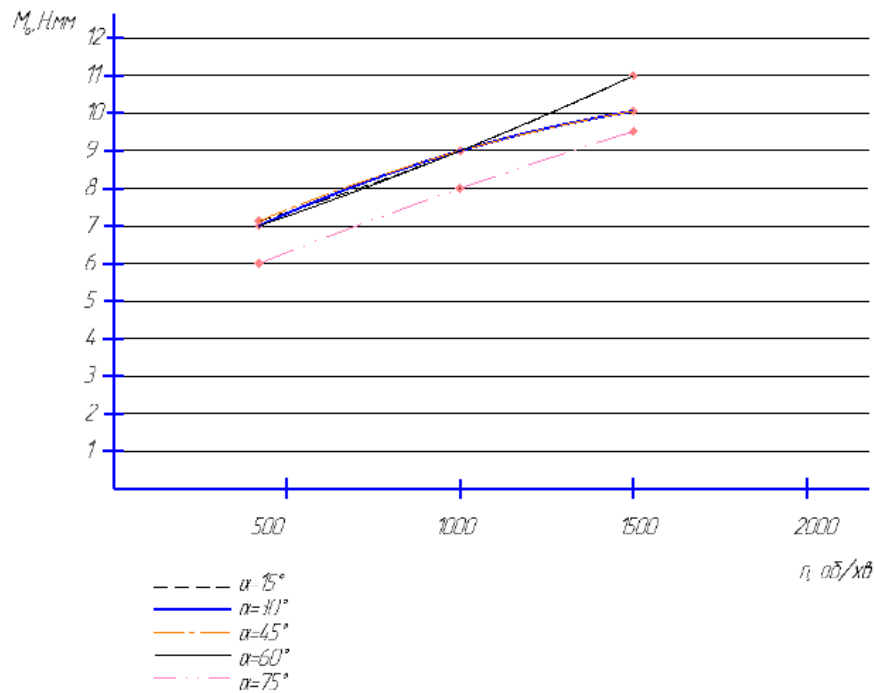


Рисунок 3.22 – Графік залежності моменту опору від частоти оборотів при одночасних осьових і радіальних навантаженнях

Далі заносимо отримані за результатом експерименту дані у розрахунковий комплекс MatLAB у наступному вигляді [29]:

```
In[11]:=
data={ {400,0,7.05},{1500,0,9.05},{2000,0,11.05},{400,15,7.05},{1500,15,9.00},{2000,15,11},{400,30,7.0},{1500,30,9.0},{2000,30,10},{400,45,7.05},{1500,45,9.0},{2000,45,10},{400,60,7.}, {1500,60,9.0},{2000,60,9.5},{400,75,7},{1500,75,8},{2000,75,9.5},{500,90,7.}, {1500,90,8},{2000,90,9}}.
```

В результаті обчислення отримали математичну модель:

$$M_0 = 7,19799 - 0,00918255 \cdot \alpha + 0,0000135213 \cdot \alpha^2 - 5,51553 \cdot 10^{-7} \cdot \alpha^3 + 0,000490954 \cdot n + 5,77174 \cdot 10^{-7} \cdot n^2$$

Проаналізувавши отримані графіки, можна зробити висновок, що при взаємодії радіального та осьового навантажень залежність моменту опору від числа обертів має прямопропорційний характер. А при окремих радіального та осьового навантаженнях має гіперболічний вигляд, що вказує на її складну передбачуваність.



## ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ТЕХНОГЕННА БЕЗПЕКА В ГАЛУЗІ

### 4.1 Виявлення та оцінка шкідливих факторів виробничого середовища

#### 4.1.1 Характеристика ступеня безпеки технологічного процесу, рівня механізації й автоматизації

Досить повне подання про рівень механізації можна одержати шляхом певних витрат механічної й ручної праці.

– для електрозварювача:

$$B = \frac{M}{M + R} \cdot 100\% = \frac{6}{18 + 6} \cdot 100\% = 25\% \quad (4.1)$$

де: В - рівень механізації праці;

М - сума людино - годин механізованої праці;

Р - сума людино - годин ручної праці.

Вихідні дані й отримані результати зведені в таблицю 4.1

Таблиця 4.1 – Розрахунок рівня механізації праці

№ п/п	Професія робітників	Штат робітників	Кількість відпрацьованих людино-годин у зміні			% механізованої праці
			вручну	За допомогою машин	Усього	
1	Електрогазо-зварник	3	6*3=18	2*3=6	24	25
2	Слюсар-ремонтник	24	6,5*24=156	1,5*24=36	192	18,75
3	Мастильник	2	5,5*2=11	2,5*2=5	11	45,45
4	Оператор ножиців	1	2,5*1=2,5	5,5*1=5,5	8	68,75
5	Крановий машиніст	1	1*1=1	7*1=7	8	87,5

Слюсар ремонтник і слюсар мастильник відносяться до групи ручної праці (до 30%), слюсар інструментальник і слюсар ремонтник (мастильник) відносяться до групи змішаної праці (30% - 60%), крановий машиніст і оператор ножиців відноситься до групи механізованої праці (60» - 100%).

#### 4.1.2 Аналіз потенційних і шкідливих факторів виробничого середовища

Розглянемо карту умов праці вальцювальника дрсирувального стана 1700 (табл. 4.2).

Таблиця 4.2 – Технологічна карта умов праці вальцювальника

Фактори	Нормативне значення, ГДК, ГДР	Фактичне значення	III клас шкідливих і небезпечних умов, і характер праці			Час дії фактора % у зміну
			1 ст.	2 ст.	3 ст.	
1	3	4	5	6	7	8
I. Шкідливі хімічні речовини, мг/м <sup>3</sup>						
1 клас безпеки						
Ангідрид хромовий	0,01	0,012	1,2			94,6
2 клас безпеки						
Марганцю оксиди	0,3	0,39	1,3			94,6
Кислота сірчана	1,0	0,76				94,6
3–4 клас безпеки						
Масла мінеральні	5,0	9,2	1,8			94,6
II. Пил переважно фіброгенної дії, мг/м <sup>3</sup>						
диоксид кремнію – (2 – 10%)	4,0	19,6		4,9		94,6
III. Шум, дБА	80	102			22	100
IV. Мікроклімат у приміщенні						
– температура повітря, °С	16–27	36,2			9,2	94,6
– швидкість руху повітря, м/с	0,2–0,5	0,36				94,6
– відносна вологість повітря, %	55	31				94,6
V. Робоча поза						
Змушені нахили корпуса більше 30° (раз за зміну)	<100	135	135			
VI. Напруженість праці						
– тривалість зосередження, % до тривалості зміни	72	62,9				
– щільність сигналів у середньому за годину	<100	366	366			
Кількість факторів	–	–	5	1	2	–

## Висновок

Наведені вище шкідливості спричиняють появі окремих ознак профзахворювань, а також спричиняють ріст патологій з короткочасною втратою працездатності [30]. Відповідно до гігієнічної класифікації праці робоче місце вальцовальника відноситься до III класу, у якому шкідливі умови праці перевищують гігієнічні нормативи шкідливих факторів, і мають у наявності: 5 факторів 1 ступеня, 1 фактор 2 ступені, 2 фактора 3 ступені. По показниках робоче місце варто вважати зі шкідливими й важкими умовами праці, що відповідає показникам списку №1 пункт 1.

Передбачено наступні пільги: пенсійне забезпечення – список №1; доплати становлять – 12%; додаткові відпустки – 14 днів;

### 4.2 Заходи захисту від впливу шкідливих факторів виробничого середовища

У таблиці 4.3 наведені фактори виробничого середовища трудового процесу й заходи щодо їхнього усунення на ділянці дресирувального стана.

Таблиця 4.3 – Технічні засоби захисту від впливу шкідливих факторів виробничого середовища

№ п/п	Фактор виробничого середовища	Захисний пристрій	Тип пристрою	Параметри пристрою	Місце встановлення
1	Запиленність	Витяжна вентиляція	КСЗ	–	У місцях утворення пилу
2	Запилованість	Респіратор СІЗОД	ШБ–1М	–	Індивідуально
3	Шум	Навушники, біруші		до 110 дБ	Індивідуально
4	Температура Хол період	Утеплена куртка, ватяні штани, костюм х/б, черев.	Тн	–	Індивідуально
	Тепл період року	костюм з х/б тканини, черевики	Ти		
5	Шкідливі речовини	костюм х/б, рукавиці	Пм	–	Індивідуально

Шкідливості прокатної відносяться до фізичної групи. До цієї групи відносяться пил, шум, зміни температури всередині цеху [30].

Всі працівники цеху безкоштовно забезпечені спецодягом, спецвзуттям і засобами індивідуального захисту. До складу спецодягу входять: костюм х/б тканини, черевики, у зимовий час видається утеплена куртка й ватяні штани [31].

### 4.3 Технічні рішення по гігієні праці та виробничій санітарії

#### 4.3.1 Мікроклімат

Під вентиляцією розуміють систему заходів і пристроїв, призначених для забезпечення на робочих місцях, у робітниках й обслуговує зонах приміщень метеорологічних умов і чистоти повітряного середовища. Залежно від способу переміщення повітря розрізняють природну й механічну вентиляцію. Для усунення осідання пилу в приміщенні, зменшуючи її кількість у повітрі, все встаткування закрите парасолями (витяжна вентиляція), з'єднаними за допомогою воздуховодів із пристроями для очищення повітря, що видаляє. Також у прольоті металургійної ділянки використовують природну вентиляцію повітря. У такому виді вентиляції повітря надходить і віддається через щілини вікна, двері, ворота, ліхтарі.

Опалення побутових приміщень здійснюється за допомогою панелей (батарей) у які як теплоносій використовують пару з температурою до 120<sup>0</sup>С. Опалення побутових приміщень здійснюється від цеху тепловодозабезпечення.

Дієвим засобом забезпечення необхідних гігієнічних якостей повітря, що сприяють нормальній роботі, і відповідають вимогам БНіП 2.04.05–91 передбачена вентиляція деяких робочих місць. Норми мікроклімату на постійних робочих місцях зазначені в таблиці 4.4.

Таблиця 4.4 – Значення прийнятих параметрів повітряного середовища, що допускають, у робочій зоні приміщень [32]

Період року	Категорія роботи по важкості	Період року			Температура повітря непостійних робочих місць, °С
		на постійних робочих місцях			
		температура повітря, °С	відносна вологість повітря, %	швидкість руху повітря, м/с	
Холодний	Середньої важкості ІІб	15/21	75	0,2	15
Холодний	Важка ІІІ	13/19	75	0,3	13
Теплий	Середньої важкості ІІб	24/27	70	0,4	21
Теплий	Важка ІІІ	22/26	75	0,5	19

#### 4.3.2 Природне й штучне освітлення

Для створення сприятливих умов праці важливе значення має раціональне освітлення. Незадовільне освітлення затрудняє проведення робіт, веде до зниження продуктивності праці .

Характеристика освітлення ділянки дресирувального стану 1700 [33]:

- характер робіт	середня точність
- розмір об'єкта розпізнання	від 0,2 до 1 мм
- розряд зорової зони	ІV
- підрозряд роботи	В
- контрастність об'єкта розпізнавання	середня
- фон	середній
- $E_n$ - штучна (загальна)	200 лк
- коефіцієнт природної освітленості	2,24%

Для ремонту устаткування передбачене штучне освітлення. На промислових підприємствах штучне освітлення підрозділяється на робоче (для

проведення робіт у темний час доби або в місцях без достатнього природного освітлення), аварійне (для проведення роботи при аварійному відключенні робочого освітлення), евакуаційне (аварійне освітлення для евакуації людей із приміщення при аварійному відключенні робочого освітлення) і охоронне. При необхідності частина світильників того або іншого виду освітлення може використовуватися для чергового освітлення.

Штучне освітлення проектується двох систем: загальне (рівномірне або локалізоване з урахуванням розташування робочих місць) і комбіноване, коли до загального освітлення додається місцеве. Застосування одного місцевого освітлення не допускається, тому що різкий контраст між яскраво освітленими і неосвітленими місцями стомлює очі. Сповільнює швидкість реакції й нерідко є причиною нещасних випадків.

Для штучного освітлення використовується, стельові лампи типу LED, світильники типу «Астра» і «Альфа».

Для місцевого освітлення використовують лампи типу МО - 100 наколювання потужністю 150Вт і світильники НСП-0,7 - 1,4.

## 4.4 Техногенна безпека

### 4.4.1 Заходи щодо техніки безпеки при ремонтних роботах

При роботі на устаткуванні реверсного й дресируального станів необхідно, щоб дотримувалися умови техніки безпеки перед початком і в процесі й по закінченні роботи.

Перед початком роботи необхідно:

- переконається в справності роботи окремих вузлів машин;
- приступаючи до роботи перевірити електроізоляцію;

У процесі роботи:

- при проведенні робіт необхідно стежити за справністю всіх елементів привода машин;

-під час експлуатації й технічному обслуговуванні привода окремих механізмів машин необхідно дотримувати правил безпеки відповідно до ДНАОП, ДСТУ, НПАОП і ін., а також керуватися «Загальними правилами безпеки для підприємств і організацій металургійної промисловості» [34].

-до керування й обслуговування машин допускаються особи, що пройшли спеціальне навчання, що засвоїли правила охорони праці на робочому місці, а також ознайомилися з дійсним технічним описом і інструкцією для експлуатації.

Електроустаткування ділянки відноситься до установок до 1000 В. Умови безпечної експлуатації залежать значною мірою від захисних пристроїв [35].

Всі струмоведучі частини ізолювані. Як захисна ізоляція застосовують теплостійкі лаки, що електроізолюють плівки, емалеві й олійні фарби.

Покриття повинні швидко сохнути, добре зв'язуватися з покриваємою площею, та утворювати на ній токонепровідну вологонепроникну, механічно міцну плівку.

Для захисту від короткого замикання використовують швидкодіючий релейний захист і вимикачі, установлені автомати й плавкі запобіжники.

На всіх обертових частинах устаткування повинні бути встановлені захисні щити, кожухи.

На вантажопідйомному устаткуванні крім перерахованих вище вимог повинні бути встановлені обмежники вантажопідйомності, а також повинно бути відсутнім мимовільне опускання вантажу. Робота вантажопідйомних машин і пристроїв, для транспортування вантажів, у момент пусків повинне супроводжуватися звуковими сигналами [36].

Дотримання всіх норм і правил техніки безпеки приводить до значного зниження нещасних випадків на виробництві.

#### 4.4.2 Заходи пожежної безпеки

Ділянка реверсного, дресирального станів і моталок має категорію пожежонебезпеки В (горючі й важко горючі речовини й матеріали: масла, гума

кабельної проводки, речовини при взаємодії з водою або киснем і один з одним запалюються). Будинок ділянки відноситься до III ступеня вогнестійкості (будинок з несучими й конструкціями, що обгороджують, з неспалених матеріалів (табл. 4.5) [37].

Таблиця 4.5 – Межі вогнестійкості будівельних конструкцій і максимальні межі поширення вогню по ним

Ступінь вогнетривалості будівлі	Мінімальні межі вогнестійкості будівельних конструкцій, год (над ризикою)								
	стіни				Колони	Сходові площадки, коридори, балкони та марші сходових клітей	Плити, настінні, (зпідгіривом), та інші несучі конструкції	Елементи покриття	
III	Несучі й сходові клітки	Самонесучі	Наружні, не несучі (з навісних панелей)	Внутрішні не несучі (перегородка)				Плити, настінні з утеплювачем	Балки, ферми, арки й рами
		2,0/0	1,0/0	0,25/0	0,25/0	2,0/0	1/0	1/0	0,25/0

До первинних засобів пожежогасіння на комбінаті відносять: вогнегасники пінні серії ОХП–10, ОВП–10 і вогнегасники вуглекислотні серії ОУ–2, ОУ–5, ОУ–8. Пожежний інвентар (покривало з негорючого теплоізоляційного полотна, ящики з піском, пожежні цебра, совкові лопати, ломи, сокири, пожежні рукави).

Межі вогнестійкості конструкцій:

- несучі й сходові клітки – 1 год;
- самонесучі – 0,25 год;



- зовнішні несучі – 0,25 год;
- внутрішні несучі – 2 год;
- колони – 2 год;
- сходові площадки, щаблі, балки, марші сходових кліток – 1 год;
- плити, настили й ін. несучі конструкційні перекриття – 0,75 год.

Цех має внутрішній протипожежний водопровід з пожежними кранами й рукавами.

На території комбінату забороняється:

- курити в неналежних місцях, а курити необхідно в спеціально відведених місцях;
- закривати й захарашувати проїзди, під'їзди й підходи до будинків, водопроводам і пожежним гідрантам;
- виключати окремі ділянки водогінної мережі, внутрішні пожежні крани, знижувати встановлений тиск у мережах;
- допускати до вогневих робіт осіб не минулий інструктаж пожежного тих мінімуму;
- користуватися водою з пожежних водойм і засобами пожежогасіння не по прямому призначенню;
- застосовувати відкритий вогонь при огляді устаткування.

#### 4.5 Дослідження засобів зниження звукового навантаження на оператора дресирувального стана

Розрахунок необхідної звукоізоляції kabіни пульта керування  $R_{TP}$  (розраховується для кожної октавної смуги):

$$R_{TP} = L_{CYM} - L_{доп} + 10 \lg B_{И} + 10 \lg n + 6, \quad (4.2)$$

де  $L_{CYM}$  – сумарний октавний рівень звукового тиску від всіх джерел шуму

в місцях розташованих у двох метрах від розглянутої конструкції, що обгороджує, дБ;

$L_{\text{доп}}$  – припустимий рівень звукового тиску, дБ;

$V_{\text{и}}$  – постійна кабіни в даній октавній смузі;

$S_i$  – площа розглянутого огородження або його елемента,  $M^2$

$n$  – загальна кількість прийнятих у розрахунок елементів огорожень.

$V_{\text{и}}$  – постійна приміщення, що характеризує звукознижуючі властивості приміщення й залежить від його обсягу, визначають по формулі:

$$V_{\text{и}} = V_{1000} * \mu \quad (4.3)$$

де  $\mu$  – частотний множник (табл.4.6)

$V_{1000}$  – постійне приміщення на частоті 1000 Гц (залежить від обсягу й призначення приміщення): для кабіни –  $V/1,5$ .

Таблиця 4.6 – Величина коефіцієнта  $\mu$  залежно від частоти.

Октавна смуга частот, Гц	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
$\mu$	0,8	0,75	0,7	0,8	1	1,4	1,8	2,5

Розрахунок необхідної звукоізоляції кабіни (ширина 1,5 м, довжина 2 м, висота 2 м) розраховується для кожної октавної смуги частот окремо.

$$V=6 \text{ м}^3 ; S_i=12.3; V_{1000}=4; 10 \lg n=6.99;$$

$$125 \text{ Гц } R_{\text{ГР}}=93-87+20,97+6,99+6=26,52 \text{ дБ}$$

$$250 \text{ Гц } R_{\text{ГР}}=93-82+19,57+6,99+6=31,82 \text{ дБ}$$

$$500 \text{ Гц } R_{\text{ГР}}=94-78+22,37+6,99+6=36,24 \text{ дБ}$$

$$1000 \text{ Гц } R_{\text{ГР}}=89-75+27,96+6,99+6=33,27 \text{ дБ}$$

$$2000 \text{ Гц } R_{\text{ГР}}=83-73+39,14+6,99+6=27,81 \text{ дБ}$$

$$4000 \text{ Гц } R_{\text{ГР}}=80-71+50,33+6,99+6=25,72 \text{ дБ}$$

$$8000\text{Гц } R_{TP} = 75 - 69 + 69,9 + 6,99 + 6 = 18,29 \text{ дБ}$$

Таблиця 4.7 – Рівні звукового тиску на робочому місці й нормативи.

Октанова смуга частот, Гц	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Рівень звукового тиску на робочому місці, дБ	93	93	94	89	83	80	72
Рівень звукового тиску по нормативним даним	87	82	78	75	73	71	69

Таблиця 4.8 – Потрібна ізоляція кабіни по 2 класу [40]

Октавна смуга частоти, Гц	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Значення ізоляції кабіни, дБ	15–	20–	25–	30–	35–	40–	40–	35–
	24	29	34	39	44	49	49	44

Виконані розрахунки вказують на необхідність встановлення звукоізоляції кабіни згідно 2 класу [40]. Звукоізоляція кабіни має забезпечуватися наступними матеріалами: сталь 4 мм, скло 3 мм, волокнисті плити.

## ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ

1. Ознайомлення з технологією й устаткуванням прокатного цеху показало, що одним з «вузьких» місць цеху є недостатньо надійна робота підшипникового вузла робочих валків дресирувального стану 1700.
2. На підставі наведеного огляду й аналізу технічної й патентної літератури встановлено, що в якості опор робочих та опорних валків прокатних станів в світовій практиці використовуються різні конструкції підшипникових вузлів, які мають ті ж самі недоліки, що й устаткування ПАТ «Запоріжсталь».
3. В результаті модернізації підшипникового вузла робочих валків дресирувального стану 1700 будуть досягнуті наступні цілі – збільшення продуктивності, терміну служби, та зменшення незапланованих простоїв.
4. В ході розрахунків найбільш навантажених виконавчих вузлів дресирувального стану обгрунтовано правильність прийнятих рішень з приводу запропонованої модернізації;
5. Виконаний аналіз сучасних методик розрахунку підшипникових вузлів вказує на те, що одним із найважливіших факторів, що впливає на правильність вибору підшипникового вузла – є момент опору обертанню підшипника;
6. Розроблена методика експериментального визначення залежності моменту опору обертанню одночасно від частоти обертання й кута нахилу дозволила встановити, що при взаємодії радіального та осьового навантажень залежність моменту опору від числа обертів має прямопропорційний характер. А при окремих радіального та осьового навантаженнях має гіперболічний вигляд, що вказує на її складну передбачуваність.
7. Результати роботи можуть бути використані не тільки в прокатному цеху ПАТ «Запоріжсталь», але й на інших підприємствах чорної й кольорової металургії.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Ніколаєв В. О. Обтискне та сортове виробництво прокату. По дисципліні: Обтискне та сортове виробництво прокату. Навчальний посібник. Запоріжжя, ЗДІА. 2015. – 128с.
2. Тонколистова сталь : монографія / Ю. С. Пройдак та ін. Дніпро : НМетАУ, 2018. 311 с.
3. Kutsova V. Z., Kovzel M. A., Kotova T. V. Structure and properties of rolled steel after skin–rolling according to different technological production schemes. Physical metallurgy and heat treatment of metals. 2021. No. 3. P. 46–54. URL: <https://doi.org/10.30838/j.pmhtm.2413.010721.46.781>
4. Ніколаєв В., Мазур В. Виробництво плоского прокату. Запоріжжя : ЗДІА, 2010. 320 с.
5. Прищип М.Г. Обладнання прокатних цехів: навч. посібник для студентів ЗДІА металургійних спеціальностей денної та заочної форми навчання. Запоріжжя: ЗДІА, 2016. 116 с.
6. Вузол подушок робочих та опорних валків клітей кварто прокатного стану : пат. 1091955 : В21В 31/02. № 3342926 ; заявл. 06.10.1981 ; опубл. 15.05.1984. 5 с.
7. Опорний вузол прокатного валка : пат. 1015942 : В21В 31/02. № 3230424 ; заявл. 30.12.1980 ; опубл. 07.05.1983.
8. Ніколаєв В.О. Теорія обробки металів тиском. навч. посіб. Запоріжжя: ЗДІА, 2015. 110 с.
9. Ніколаєв В. О. Калібрування прокатних валків : навч. посіб. Запоріжжя: ЗГИА. 2015. 163 с.
10. Ніколаєв В. О. Теорія і технологія точної прокатки штаб: навчальний посібник для студентів ЗДІА металургійних спеціальностей денної та заочної форм навчання. Запоріжжя: ЗДІА, 2017. 100 с.
11. Ніколаєв В. О. Теорія пластичного плину твердих тіл: метод. рекомендації. Запоріжжя: ЗДІА, 2016. 24 с.

- 12.Гайдамака А. В. Підшипники кочення. Базові знання та напрямки вдосконалення :навч. посіб. Х. : НТУ «ХП», 2009. 248 с.
- 13.Нові технологічні процеси з використанням прогресивних методів пластичного деформування : монографія / О. В. Нахайчук, О. О. Розенберг, В. А. Огородніков [та ін.]. Вінниця : УНІВЕРСУМ, 2008. 159 с.
- 14.Прищип М. Г. Обладнання цехів ОМТ : метод. вказівки. Запоріжжя : ЗДІА, 2014. 79 с.
- 15.Прищип М. Г., Купріков В. О. Обладнання прокатних цехів : метод. вказівки. Запоріжжя : ЗДІА, 2017. 83 с.
- 16.Жук А. Я. , Желябіна Н. К. Основи розрахунків приводів машин: навч. посібник. Запоріжжя: ЗДІА, 1996. 145 с.
17. Електромеханічні системи автоматичного керування та електроприводи: Навч. посібник. Попович М.Г. та ін. К.: Либідь, 2005. 680 с.
- 18.Іванченко Ф. К., Гребеник В. М., Ширяєв В. І. Розрахунок машин і механізмів прокатних цехів: навч. посібник. К: Вища шк., 1995. 455 с.
- 19.Погорелов С. В. Деталі машин: конспект лекцій. Запоріжжя : ЗДІА, 2002. 137 с.
- 20.Ніколаєв В. О. Теорія та обладнання точної прокатки штаб: методичні рекомендації. Запоріжжя: ЗДІА, 2016. 52 с.
- 21.Dobrovolska L.,Vaskin O. Modernization of the control system of pressure devices of the rolled stand and their simulation. *The Scientific Heritage, Zenodo*, 102, 2022 г., pp. 65–67. doi:10.5281/zenodo.7401820
- 22.Вибір і розрахунок підшипників кочення. *Stud.* URL: [https://stud.com.ua/84705/tehnika/vibir\\_rozrahunok\\_pidshipnikiv\\_kochennya](https://stud.com.ua/84705/tehnika/vibir_rozrahunok_pidshipnikiv_kochennya) (дата звернення: 23.06.2023).
- 23.Стадник, В. А. Розрахунок та конструювання валів. Вибір підшипників кочення за динамічною вантажопідйомністю: навч. посібник. Київ : НТУУ «КП», 2014. 128 с.

24. ПІДБІР ПІДШИПНИКІВ КОЧЕННЯ – Інженерна механіка ч2. *Навчальні матеріали ТДАТУ*. URL: [https://elib.tsatu.edu.ua/dep/mtf/tm\\_10/page5.html](https://elib.tsatu.edu.ua/dep/mtf/tm_10/page5.html) (дата звернення: 13.12.2023).
25. SKF. *SKF*. URL: <https://www.skf.com/ua/services> (date of access: 13.07.2023).
26. Баранова О. В., Степанов С. М. Деталі машин. модуль № 2 «Вали та осі механічних передач. Підшипники»: методичні рекомендації. Миколаїв: МНАУ, 2021. 56 с.
27. Методичні вказівки: розрахунок підшипників кочення для студентів механічних спеціальностей. / Укл. Невдаха Ю.А., Златопольський Ф.Й., Невдаха А.Ю., Дубовик В.О. Кропивницький; ЦНТУ, 2019. 48с.
28. SKF. *SKF*. URL: <https://www.skf.com/ua/support/engineering-tools/bearing-select> (date of access: 25.07.2023).
29. Явтушенко О. В., Проценко В. М., Бондаренко Ю. В. Автоматизоване проектування процесів обробки металів тиском. Ч.2 – Математичні застави проектування технологічних процесів обробки тиском. Теорія геометричного моделювання: навчально–методичний посібник. Запоріжжя: ЗДІА, 2018. 124 с.
30. Охорона праці на гірничо–металургійному підприємстві: навч. посібник. Ч.І: Металургійний комплекс. / В.О.Шеремет та ін. Дніпропетровськ: Січ, 2002. 375 с.
31. НПАОП 0.00–4.01–08 Положення про порядок забезпечення працівників спеціальним одягом, спеціальним взуттям та іншими засобами індивідуального захисту [Електронний ресурс] // Державний комітет України з промислової безпеки, охорони праці та гірничого нагляду. – 2008. – Режим доступу до ресурсу: [http://online.budstandart.com/ru/catalog/doc-page?id\\_doc=28566](http://online.budstandart.com/ru/catalog/doc-page?id_doc=28566).
32. ДСН 3.3.6.042–99 Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень
33. ДБН В.2.5–28–2006. Інженерне обладнання будинків і споруд. Природне і штучне освітлення [Електронний ресурс] // Мінбуд України. – 2006. –

- Режим доступу до ресурсу: <http://www.gorsvet.kiev.ua/wp-content/uploads/2016/08/ДБН–В.2.5–28–2006.pdf>.
34. ДСП 3.3.1.038–99. Підприємства чорної металургії. Чинний від 1999–12–01. Вид. офіц.
35. Правила улаштування електроустановок.  
URL: <https://mev.gov.ua/storinka/pravyyla-ulashtuvannya-elektroustanovok> (дата звернення: 19.11.2023).
36. 46. НПАОП 0.00–1.75–15. Правила охорони праці під час вантажно-розвантажувальних робіт. На заміну НПАОП 63.11–7.04–84, НПАОП 63.1–1.06–85 ; чинний від 2015–03–03. Вид. офіц. 2015.
37. ДБН В.1.1–7:2016. Пожежна безпека об'єктів будівництва Загальні вимоги [Електронний ресурс] // Міністерство регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України. – 2016. – Режим доступу до ресурсу: <http://kbu.org.ua/assets/app/documents/dbn2/32.1.%20ДБН%20В.1.1–7~2016.%20Пожежна%20безпека%20об'єктів%20будівни.pdf>.
38. Геврик Е. О. Охорона праці. Навчальний посібник для студентів вищих навчальних закладів. / Е. О. Геврик. – К: Ельга, Ніка-центр, 2003. – 280 с..
39. Ткачук К. Н. Охорона праці та промислова безпека. Навч. посіб. / К. Н. Ткачук. та ін. – К: Основа, 2009. – 360 с.
40. ДСТУ–Н Б В.1.1–35:2013. Настанова з розрахунку шуму в приміщеннях і на територіях. Чинний від 2014–01–01. Вид. офіц.
41. Румянцев В. Р. Методичні вказівки до виконання розділу «Охорона праці та техногенна безпека» у дипломних роботах (проектах) для студентів ЗДІА спеціальностей МЧМ, МБ та інші / В. Р. Румянцев, І. О. Ткаліч. – Запоріжжя: ЗДІА, 2012. – 16 с.



## СПИСОК ГРАФІЧНОГО МАТЕРІАЛУ

№ п/п	Найменування	Кільк. листів	Форма т
1	Дресирувальний стан 1700	1	A1
2	Натискний пристрій робочої кліті стана 1700	2	A1
3	Підготовка до експерименту з дослідження моменту опору обертання підшипника	1	A1
4	Результати дослідження впливу кута нахилу та частоти обертання на момент опору підшипника кочення	1	A1
5	Дослідження засобів зниження звукового навантаження на оператора дресирувального стана	1	A1

## ДОДАТКИ